

IMMERSIONI E DECOMPRESSIONE

Fisiopatologia
della malattia da
decompressione
(DCS)

Strategie e modelli
decompressivi

Fattori
predisponenti la
DCS

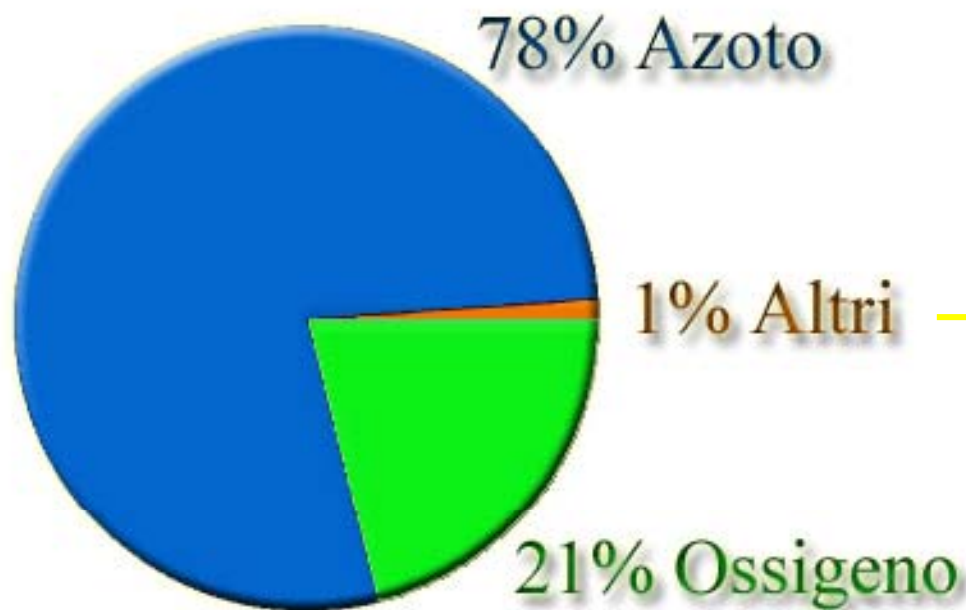


La fisiopatologia della decompressione



I gas in gioco nelle immersioni in aria

Composizione relativa dell'aria



→ **CO₂ (0.03%)**

I gas in gioco

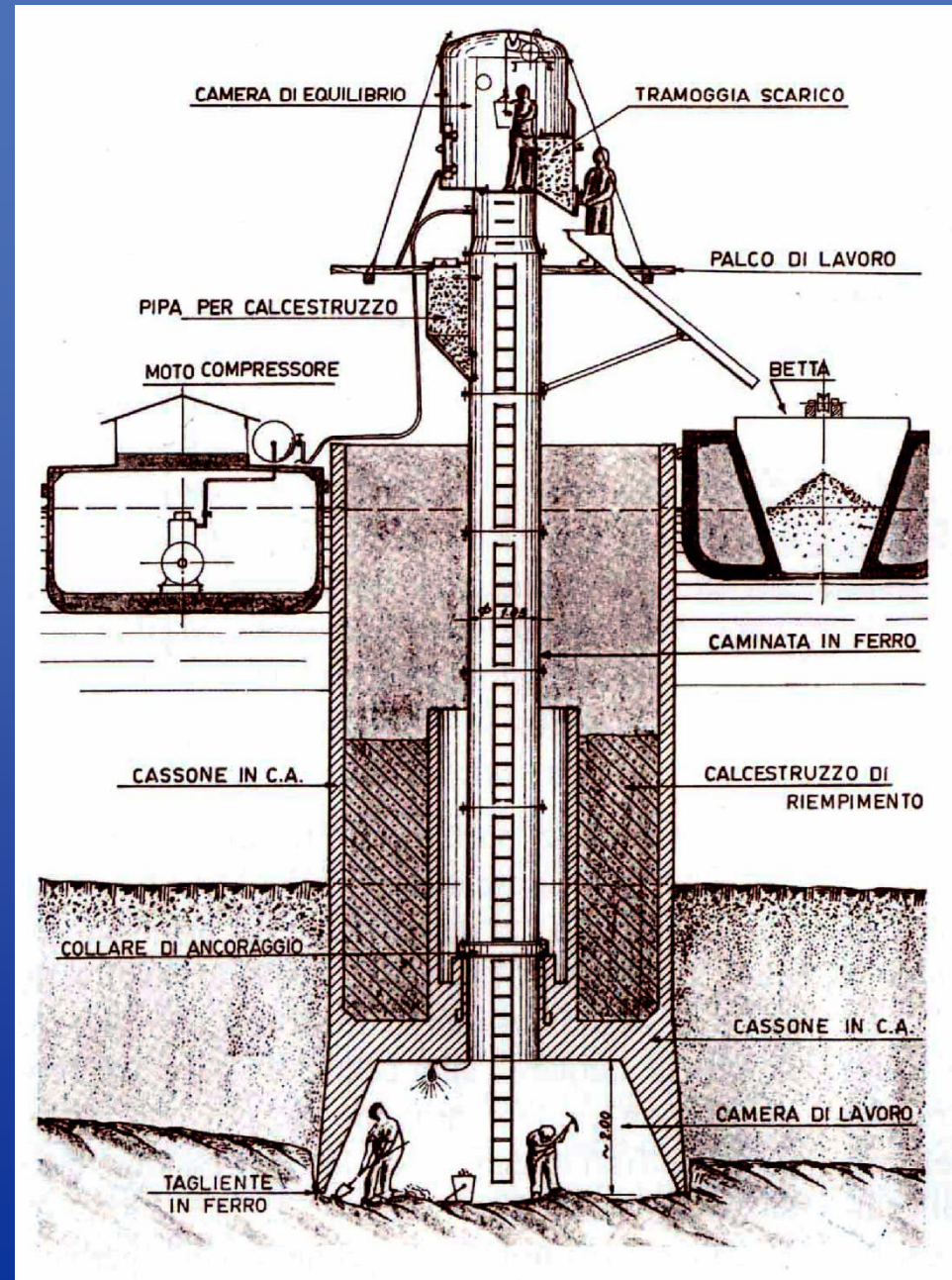
Composizione relativa dell'aria



Breve storia della malattia da cassoni

I cassoni sono strutture utilizzate per il lavoro al di sotto della superficie dell'acqua. Si usano per esempio per gettare le basi dei pilastri dei ponti. All'interno del cassone l'ambiente pressurizzato impedisce l'ingresso di fango o altri detriti liquidi dal fondo.

I pilastri del ponte di Brooklyn (1870-1883) furono costruiti in questo modo.



Breve storia della malattia da cassoni

- I lavoratori dei cassoni una volta lasciato l'ambiente compresso e ritornati a pressione atmosferica manifestavano frequentemente dolori alle articolazioni (detti *bends*) che talvolta si aggravavano fino a causarne la morte in pochi giorni.

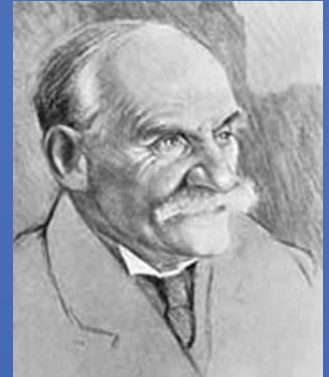
Prima degli studi di Haldane

- Fu il fisiologo francese **Paul Bert**, nella seconda metà dell'ottocento, a mettere per primo in relazione le patologie dei cassonisti con l'elevato quantitativo di azoto che veniva forzato nel loro organismo durante i lunghi turni di lavoro a pressione maggiorata.

Prima degli studi di Haldane

- Lo stesso Paul Bert capì che era impossibile eliminare l'azoto dalla miscela respiratoria a causa della tossicità dell'ossigeno (acuta e cronica) già a pressioni parziali molto basse.

Gli studi di Haldane



- Il fisiologo **John Scott Haldane** (1860-1936) fu il primo a comprendere i meccanismi della malattia da cassoni (oggi denominata patologia da decompressione o DCS) ed a elaborare un sistema per consentire operazioni subacquee fino a profondità di 50 metri, senza incorrere in gravi DCS .

I principi di Haldane

- Le ricerche di Haldane si conclusero nel 1908 con la pubblicazione dell'articolo: "La prevenzione delle patologie causate dall'aria compressa", in cui egli riassumeva le conclusioni dei suoi studi attraverso l'esposizione di 4 principi fondamentali.

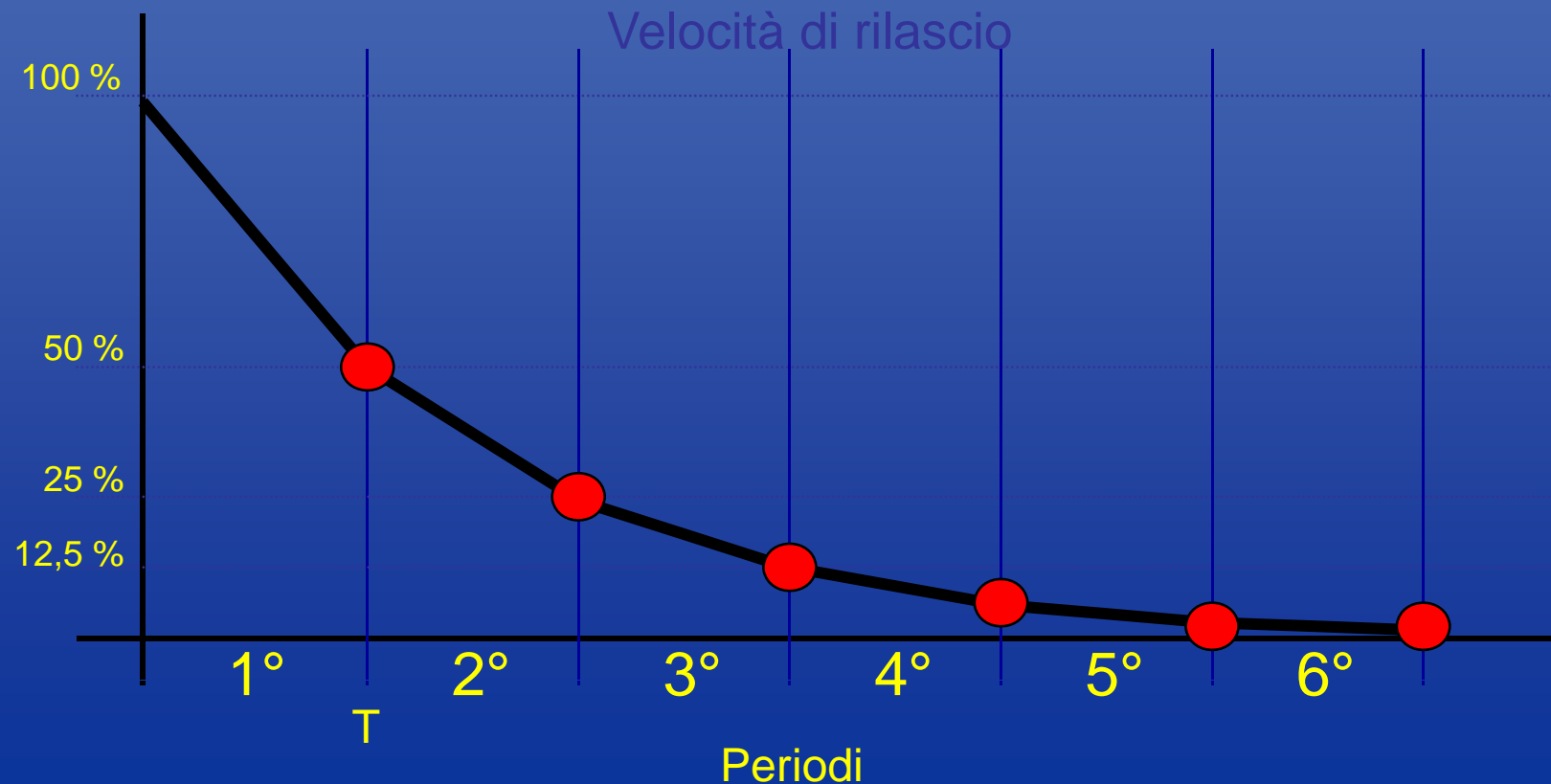
I principi di Haldane

1. L'assorbimento e il rilascio di gas dai tessuti non avvengono a velocità costante, ma seguono una dinamica esponenziale:



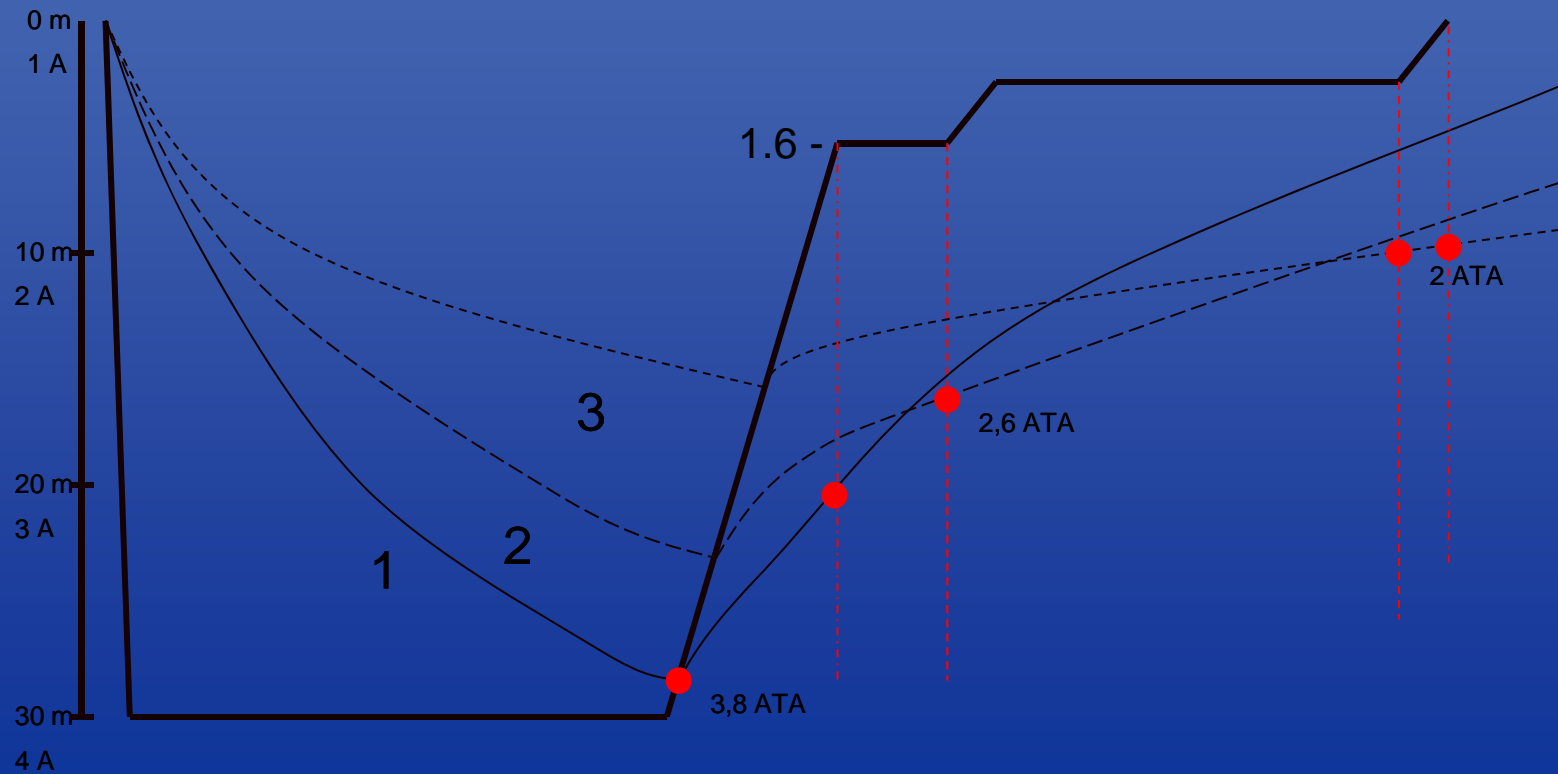
I principi di Haldane

2. La velocità di saturazione cioè il tempo di emisaturazione (T) è diverso per ogni tessuto;



I principi di Haldane

3. La pressione parziale del gas in un tessuto non deve mai superare di più di 2 volte quella ambientale;



I principi di Haldane

4. La decompressione può iniziare con un calo marcato della pressione ambientale.

Questo in contrapposizione alle teorie di altri studiosi dell'epoca che proponevano un calo progressivo e lento della pressione ambientale per la prevenzione dei bends.

DINAMICA DELL'ASSORBIMENTO DEI GAS

PERFUSIONE

Caratteristica di un tessuto e, a parità di tessuto, dipendente dall'irrorazione (attività)

DIFFUSIONE

L'inerte diffonde all'interno di un tessuto e da questo ai tessuti adiacenti

Durante la discesa l'assorbimento dell'inerte avviene principalmente per PERFUSIONE

Durante la permanenza sul fondo l'assorbimento dell'azoto avviene principalmente per DIFFUSIONE

Adeguamenti dei principi di Haldane

Aumento del numero dei compartimenti teorici

Haldane	5
USNavy	6
Buhlmann	16
Computer subacquei	8-12



Adegamenti dei principi di Haldane

Rapporto critico di sovrappressione

Haldane

2:1

compartimenti più veloci

3.15:1

compartimenti più lenti

1,55:1

“Valore M”

Le tabelle di decompressione: un modello compartimentale

Teoria di Haldane

Valore $M=2$ in ogni tessuto teorico

La sovrassaturazione tissutale (compartimentale) calcolata matematicamente (modello) guida la decompressione. I valori M vengono “aggiustati” in base agli incidenti registrati.

Tabelle U.S. Navy

Valore “ M ” diverso in ogni compartimento

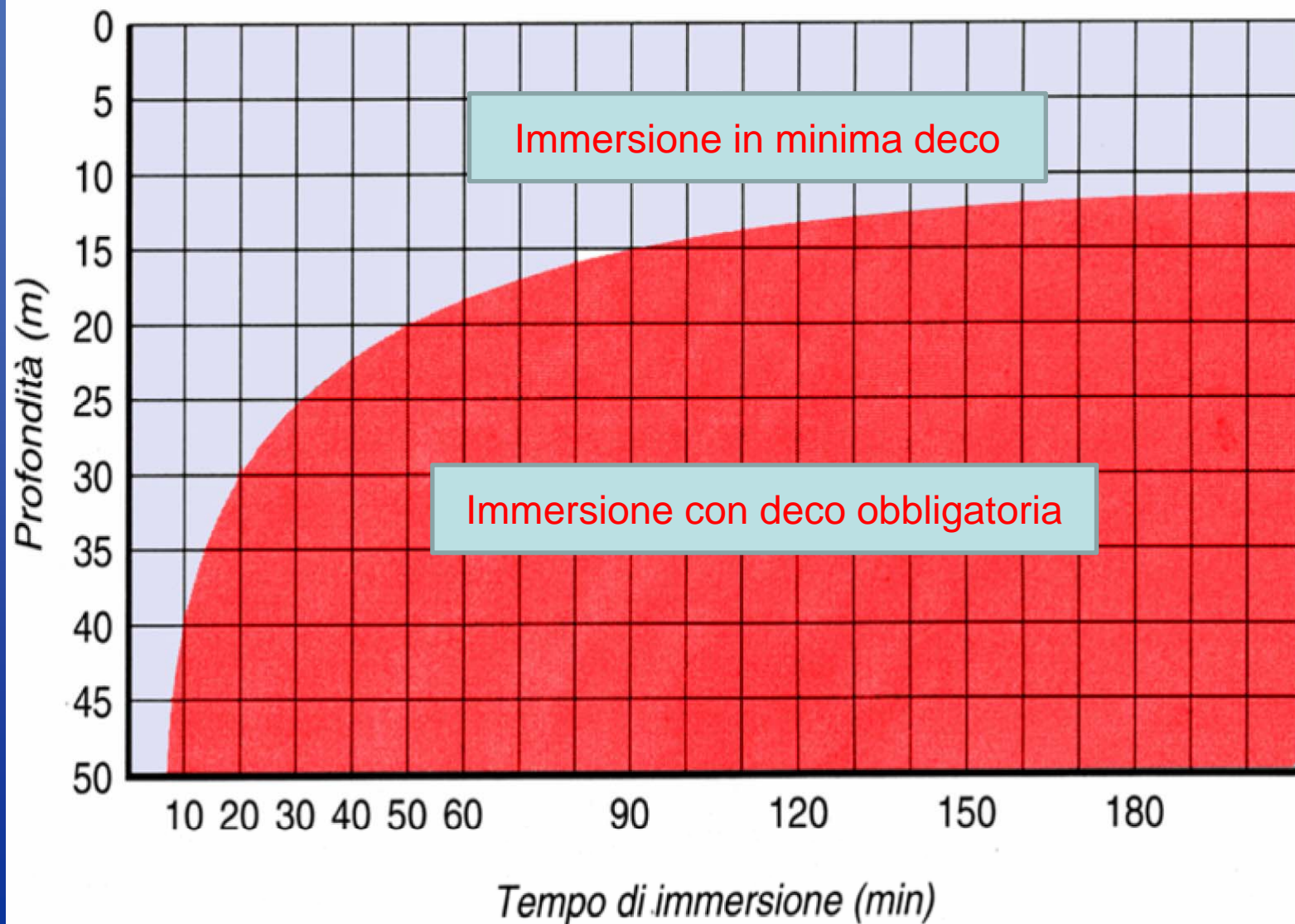
T	Valore “ M ”
5'	3.15
10'	2.67
20'	2.18
40'	1.76
80'	1.58
120'	1.55

Le tabelle di decompressione: compartimentali, affidabili ma migliorabili

TABELLA DI DECOMPRESSIONE E IMMERSIONE U.S. NAVY

METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	DECO	GRUPPO	METRI	MINUTI	
-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	------	--------	-------	--------	--

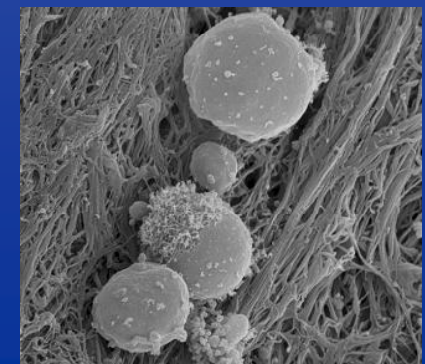
La curva di sicurezza



La malattia da decompressione DCS

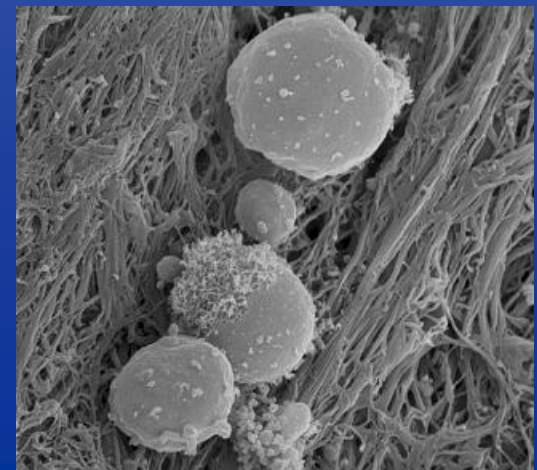
Fisiopatologia della DCS: I vasi sanguigni sono il primo bersaglio delle bolle.

- Le bolle (diametro $> 50\ \mu\text{m}$) interagiscono con le cellule e con le proteine del sangue.
- Stimolano l'aggregazione piastrinica
- Attivano i leucociti
- Attivano il complemento e la cascata della coagulazione



Fisiopatologia della DCS: I vasi sanguigni sono il primo bersaglio delle bolle.

- Le microbolle (diametro $< 50 \mu\text{m}$) e le microparticelle interagiscono prevalentemente con le proteine del sangue e con l'endotelio.
- Stimolano la formazione di microparticelle
- Attivano fenomeni infiammatori



Le microparticelle in deco



J Appl Physiol 110: 340–351, 2011.

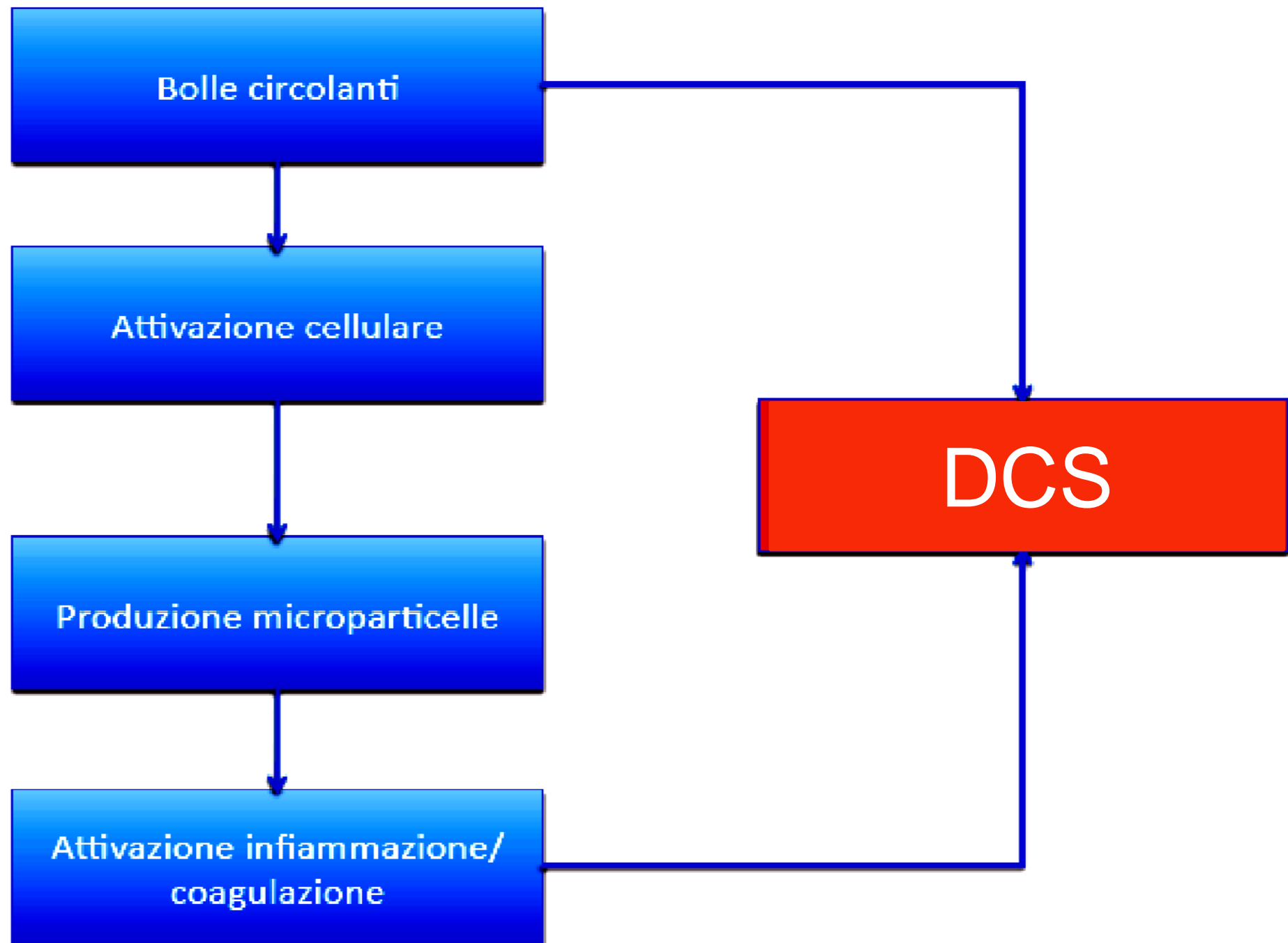
First published October 21, 2010; doi:10.1152/jappphysiol.00811.2010.

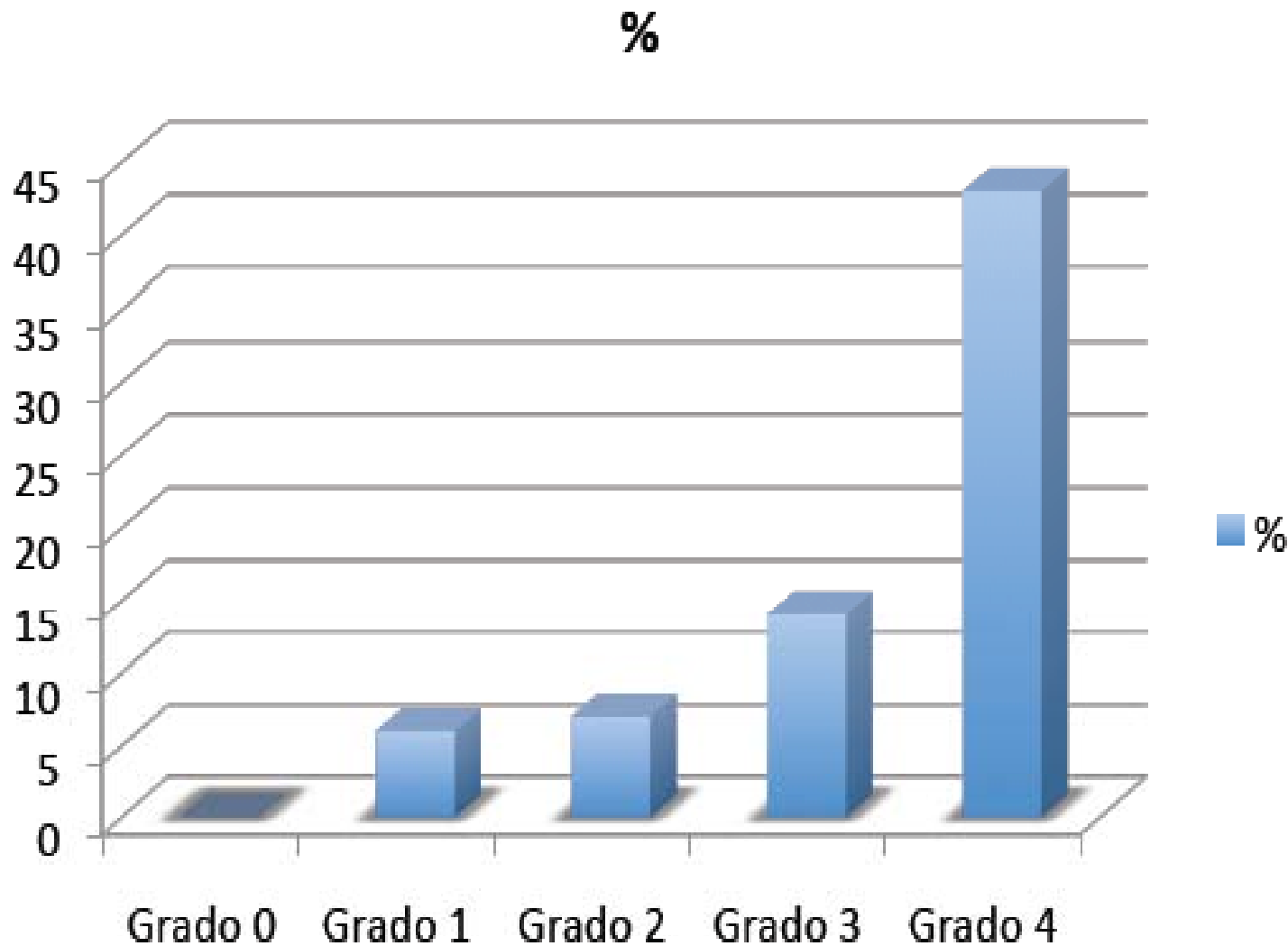
Microparticles initiate decompression-induced neutrophil activation and subsequent vascular injuries

Stephen R. Thom,^{1,2} Ming Yang,¹ Veena M. Bhopale,¹ Shaohui Huang,¹ and Tatyana N. Milovanova¹

¹Institute for Environmental Medicine and ²Department of Emergency Medicine, University of Pennsylvania Medical Center, Philadelphia, Pennsylvania

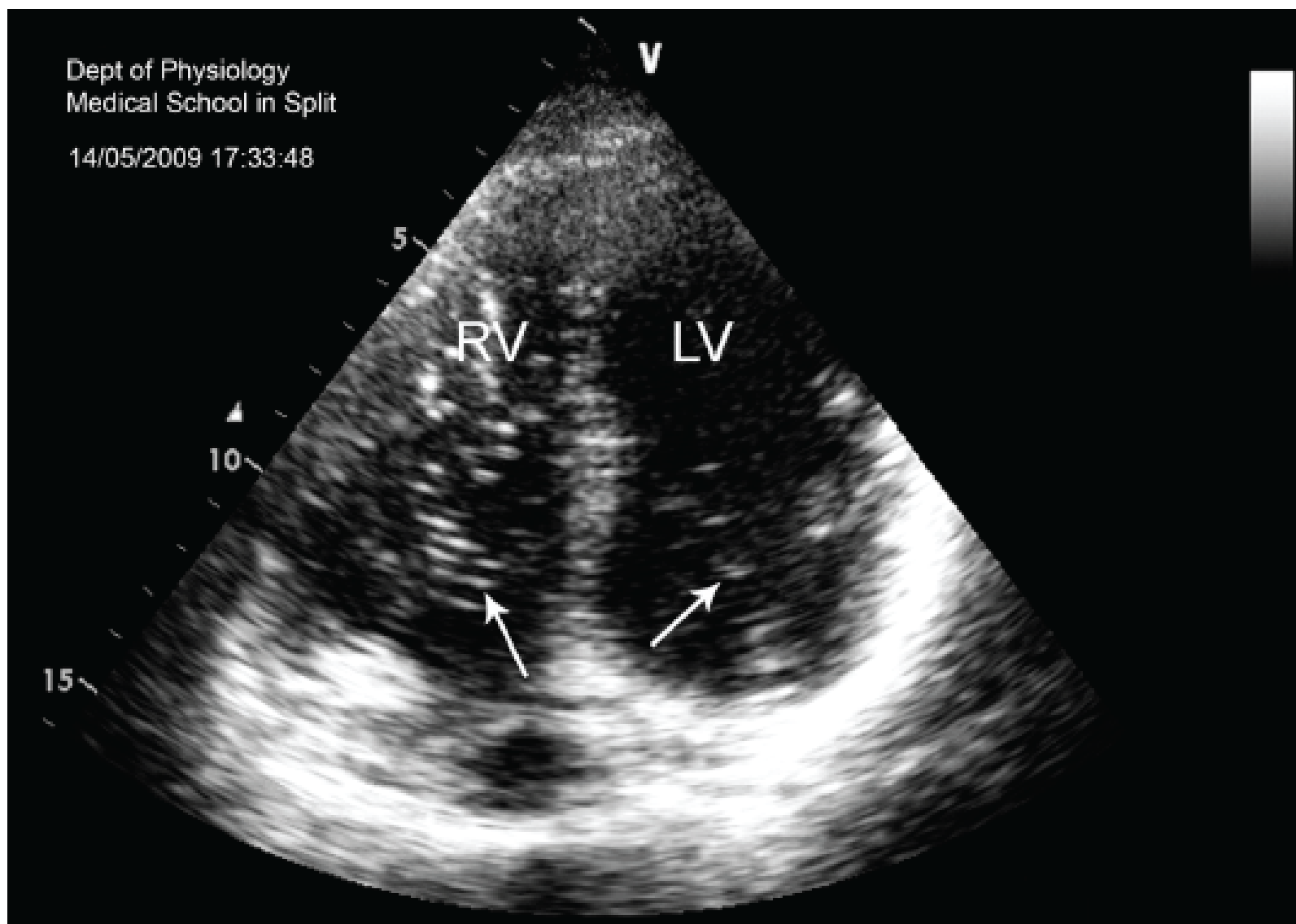
Submitted 20 July 2010; accepted in final form 14 October 2010



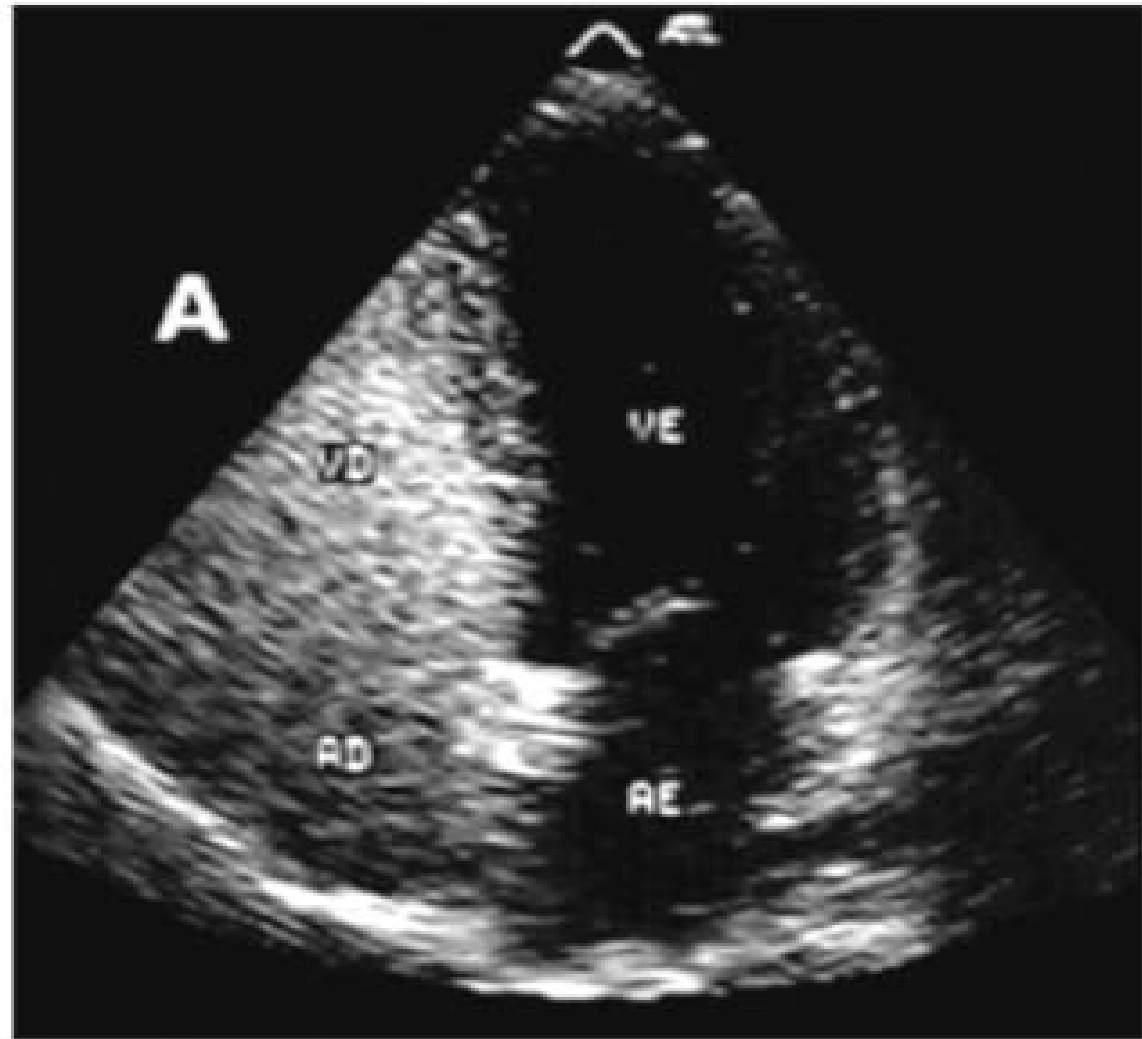


Frequenza di DCS in base al numero di microbolle circolanti documentabili con ecocardiografia.

The presence of gas emboli in the heart after diving.



resenza di Bolle
rado 4
cala EFTEDAK & BRUBAKK



Marabotti C et al. Undersea Hyp Med 1999, 26 (3): 151-158

Classificazione DCS

- **Tipo I**

Dolore localizzato alle articolazioni o prurito a livello cutaneo (FOP, attenzione!!!)

- **Tipo II**

Cardiovascolare/Polmonare/neurologica: le bolle in gran numero si muovono nel sistema circolatorio. Il gran numero di bolle interferisce con il sistema circolatorio e respiratorio (cokes), arrivando fino al cervello.

Classificazione DCS

- **Tipo III**

MDD a livello vestibolare o dell'orecchio interno

- **Tipo IV**

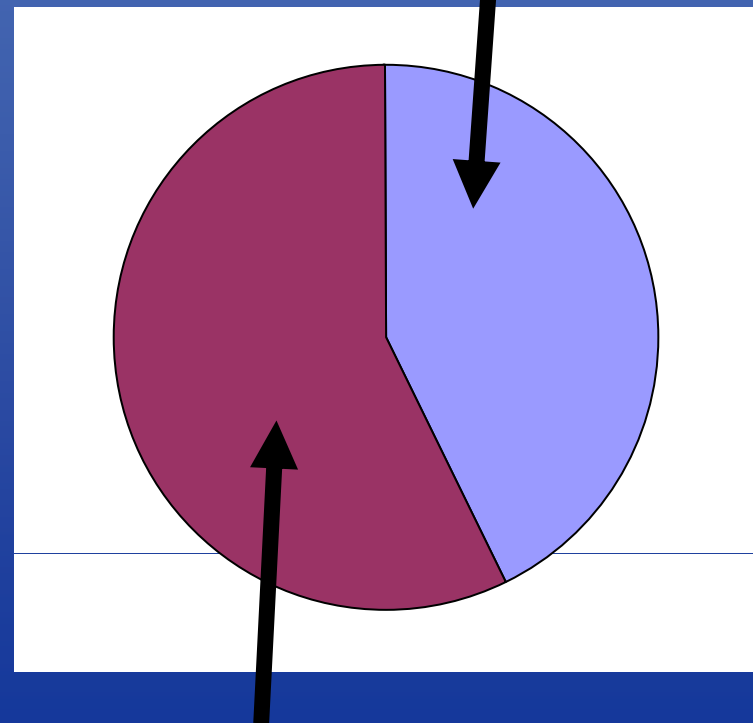
Necrosi ossea asettica. Tipica dei lavoratori subacquei con incidenze 5-50%. Non si conosce l'incidenza nei TEK, ma qualche caso è noto.

- **CLASSIFICAZIONI ALTERNATIVE !!!**

Rischio di DCS

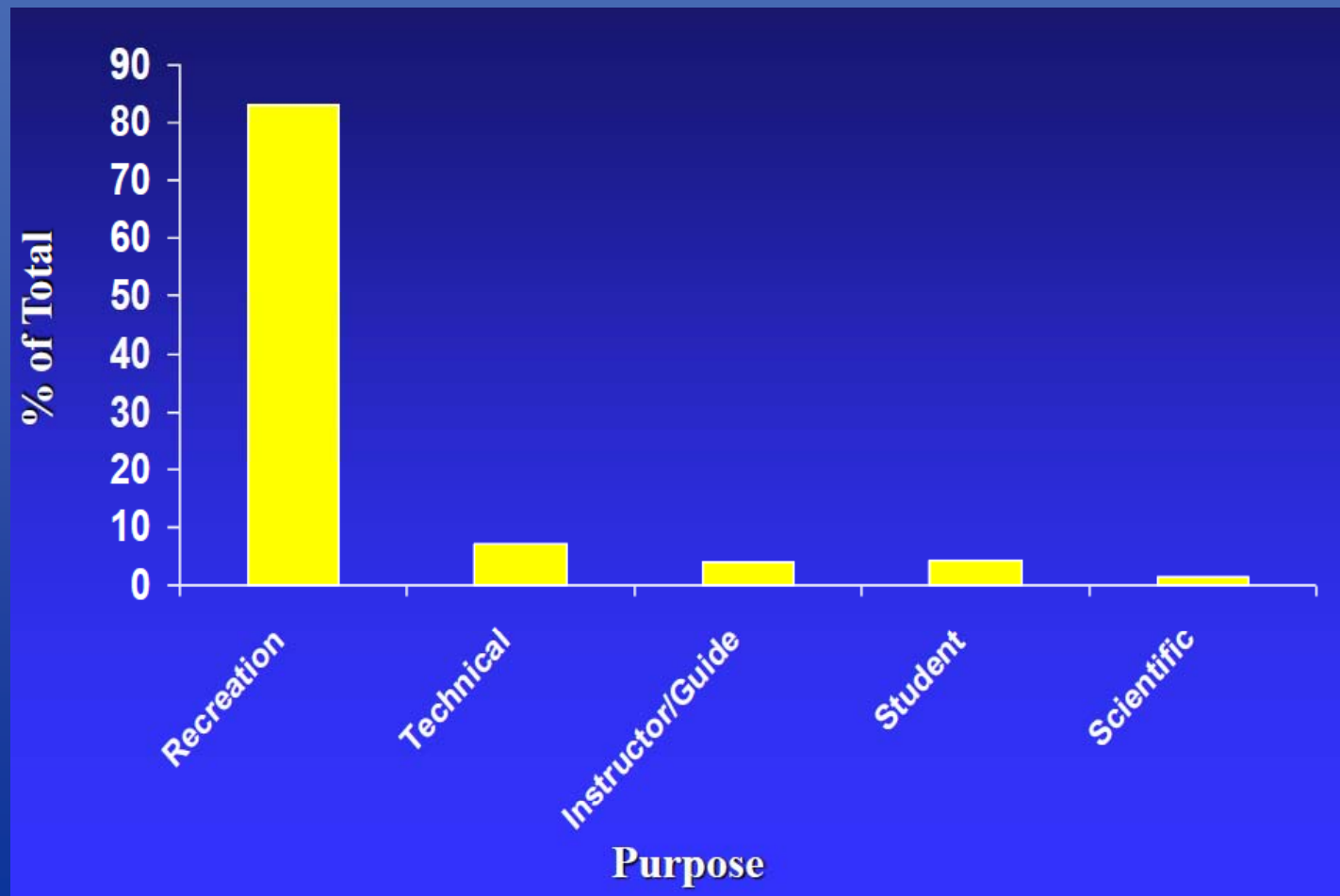
- 1 caso ogni 80.000 immersioni entro i 30 m
- 1 caso ogni 4500 immersioni oltre i 30 m “fuori curva”

Meritate: 42,4%



Immeritate: 57.6

Distribuzione degli incidenti per tipologia d'immersione



Gli altri modelli decompressivi



**Modelli
Compartimentali**

**Modelli
Probabilistici**

**Modelli a controllo
delle bolle (doppia
fase)**

I modelli compartimentali

- Si basano sul concetto che tutto il gas inerte diffonde dai compartimenti nel sangue interamente in forma disciolta.
- Solo se nei compartimenti in esame si supera il valore M siamo in una situazione di sovrasaturazione con formazione di bolle di gas inerte.

I modelli probabilistici

- Utilizzano funzioni matematiche di sopravvivenza e di rischio, ottimizzate per spiegare dati di immersioni reali o sperimentali.

Computers in Biology and Medicine 43 (2013) 1739–1747

Contents lists available at ScienceDirect

Computers in Biology and Medicine

journal homepage: www.elsevier.com/locate/cbm

Analytic gain in probabilistic decompression sickness models

Laurens E. Howle^{a,b,*}

^a Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Duke University, Durham, NC 27708-0300, USA
^b BelleQuant Engineering, PLLC, Mebane, NC 27302-9281, USA

ARTICLE INFO

Article history:
Received 14 May 2013
Accepted 24 July 2013

Keywords:
Scuba diving
Decompression sickness
Optimization
Survival analysis
Mathematical modeling
Parameter estimation

ABSTRACT

Decompression sickness (DCS) is a disease known to be related to inert gas bubble formation originating from gases dissolved in body tissues. Probabilistic DCS models, which employ survival and hazard functions, are optimized by fitting model parameters to experimental dive data. In the work reported here, I develop methods to find the survival function gain parameter analytically, thus removing it from the fitting process. I show that the number of iterations required for model optimization is significantly reduced. The analytic gain method substantially improves the condition number of the Hessian matrix which reduces the model confidence intervals by more than an order of magnitude.

© 2013 Elsevier Ltd. All rights reserved.

I modelli a controllo delle bolle

- Oggi sappiamo che piccole bolle di gas (microbolle) e pulviscolo sono presenti nel sangue in ogni istante, e aumentano con la decompressione.
- I modelli doppia fase considerano il volume critico di bolle, cioè la quantità totale di gas presente ed il volume critico delle bolle.

Deco: modelli compartimentali e a doppia fase

- Modelli compartimentali sono le tabelle decompressive e gli algoritmi di molti computer subacquei)
- Il modello a doppia fase si basa sull'osservazione ecografica che dimostra la presenza di bolle circolanti dopo qualunque immersione (falla dei modelli compartimentali). Considera sia la quota di gas in fase disciolta sia il comportamento del gas in fase gassosa.
- Partendo da questo presupposto il modello pone in essere strategie decompressive concettualmente diverse da quelle generate da algoritmi compartimentali.

Deco: modelli compartimentali vs. doppia fase

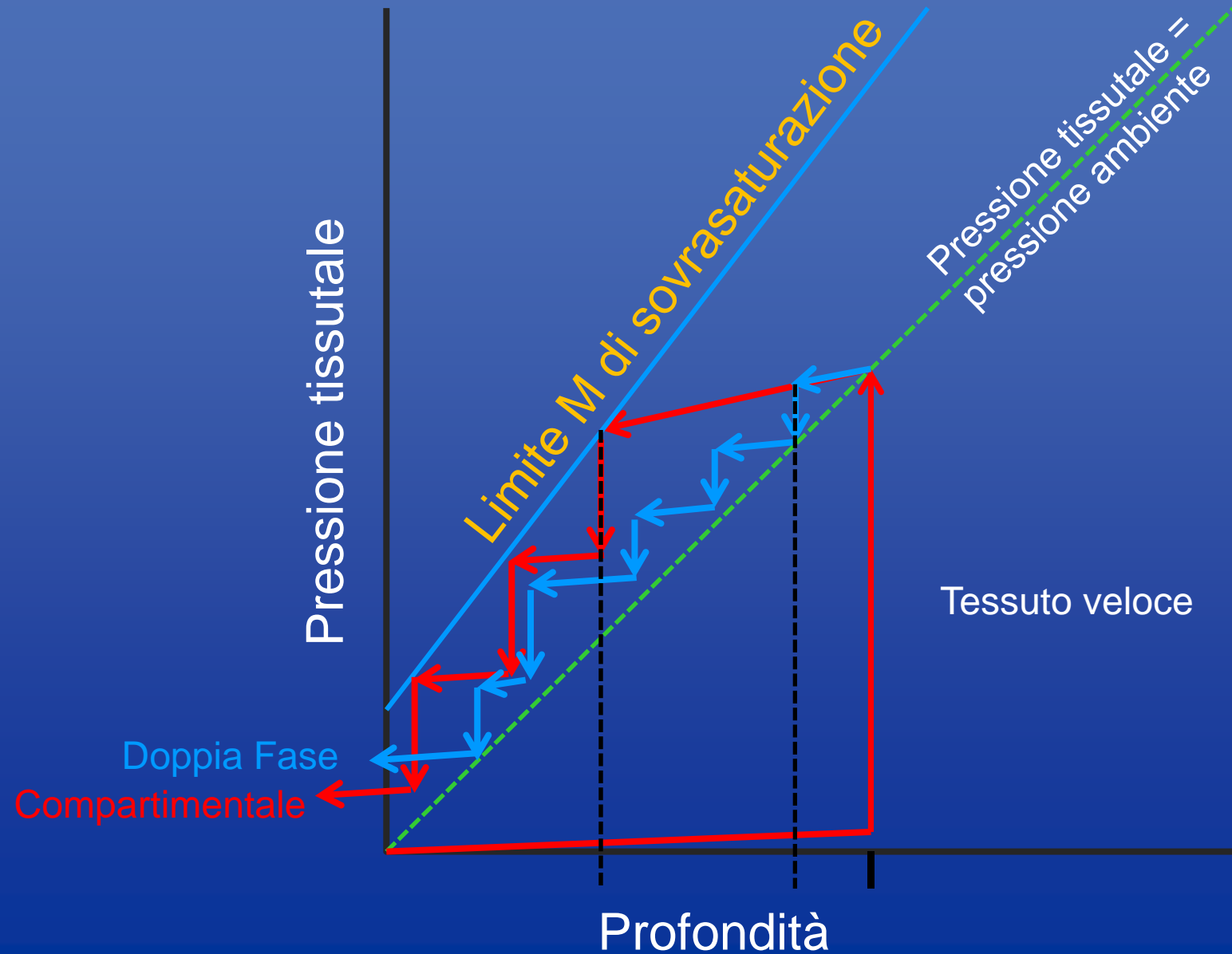
- I modelli compartimentali calcolano le tappe di deco valutando per ogni tessuto come è la saturazione in base al relativo valore M (quota e tempo della tappa deco).
- I modelli doppia fase, considerano il volume critico di gas in fase aerea, superato il quale si manifestano i sintomi di PDD: l'organismo sarebbe in grado di tollerare una certa quantità di bolle circolanti in relazione al loro “volume totale”.

Deco: modelli compartimentali vs. doppia fase

La strategia decompressiva legata ai modelli a doppia fase prevede quindi che il profilo di risalita sia tale da mantenere il maggior numero possibile di bolle al di sotto del valore di raggio critico. Questo si ottiene mantenendo alta la pressione ambiente e relativamente basso il gradiente pressorio tra bolla e tessuto.

Ciò implica una strategia decompressiva che preveda in una prima fase tappe fonde (alta P ambiente, basso gradiente pressorio) che consentano alle bolle di rimanere al di sotto del raggio critico. Durante le tappe fonde i compartimenti lenti continuino a “caricare” gas inerte, ed ecco perché le tappe fonde devono essere brevi, proprio per evitare un'eccessiva saturazione dei tessuti lenti che potrebbero poi “presentare il conto” durante le tappe più superficiali.

Deco: modelli compartimentali vs. doppia fase



Computer attuali

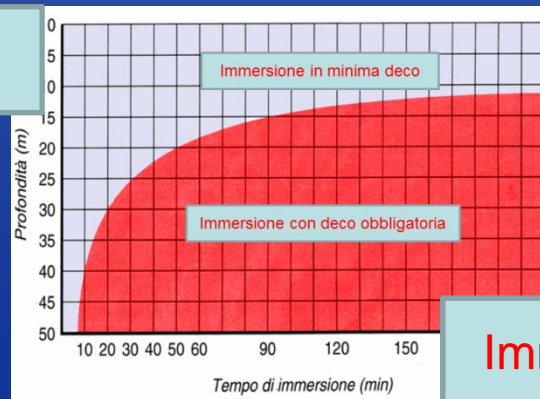
- I moderni computer per immersione basati sul modello RGBM di Weinke et al. (evoluzione del V-Planner, prevedono più soste di sicurezza profonde da 1-2 minuti).
- Sono modelli compartimentale corretti per la doppia fase!



Strategie decompressive

- Piano di immersione
- Piano dei Gas
- Strategia decompressiva

Immersione in minima deco



Immersione con deco obbligatoria

Immersioni in minima deco

SAFETY STOP

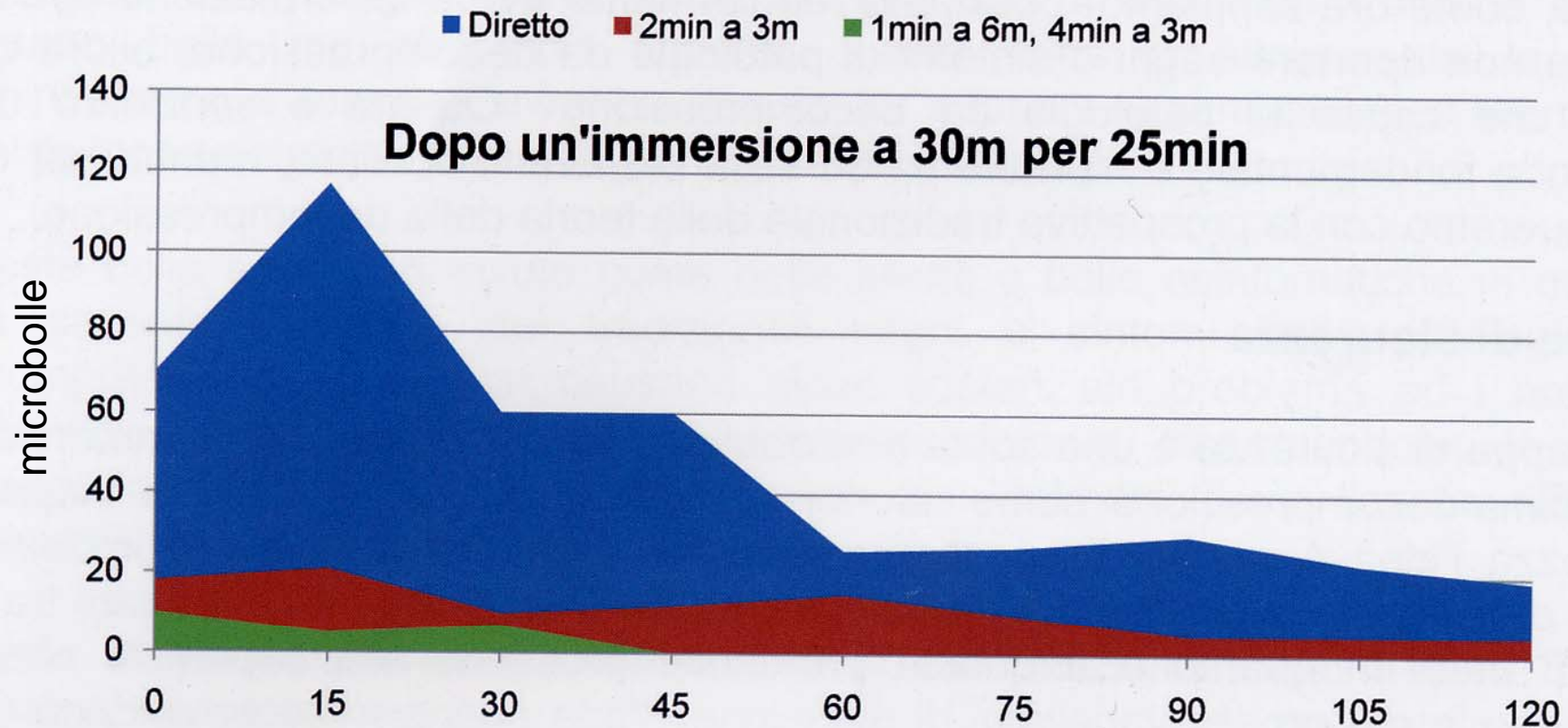


Figura 25: Impatto delle tappe di sicurezza su immersioni in minima-decompressione. Fonte AAS

DEEP STOP

Metà pressione?

Metà profondità?

1 minuto?

2 minuti?

$(\text{Prof max} + \text{Prof deco}) / 2$

2/3 della profondità massima?

La tendenza è quella di abbassare la quota della deep stop, ma...

DEEP STOP

Nelle immersioni in minima deco la deep stop e la safety stop dovrebbero essere considerate obbligatorie.

Meglio non acquistare computer che non le prevedono.

DEEP STOP

1° immersione 25 m, 25 min

2° immersione dopo tre ore 25m 20 min

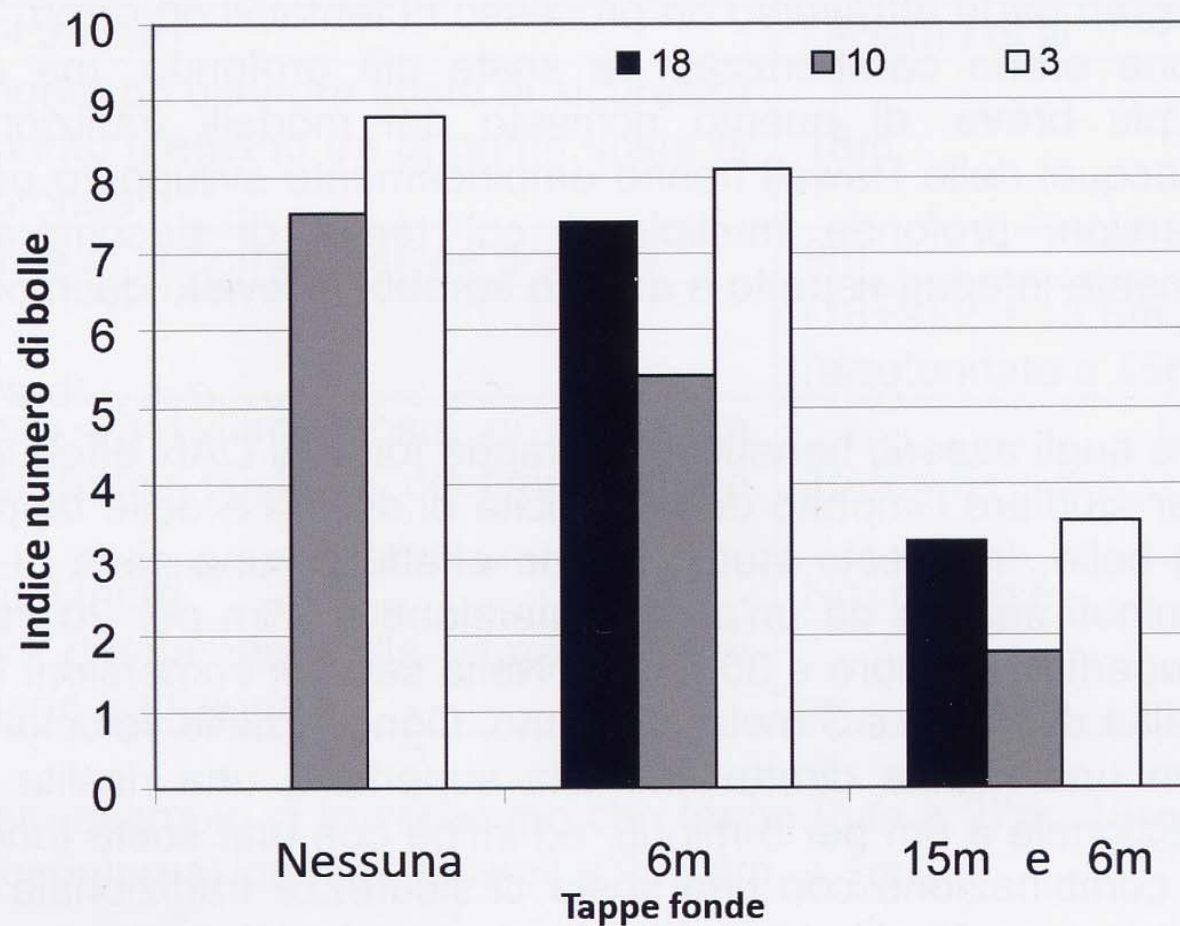


Figura 71: Impatto delle tappe fonde sull'indice di numero delle bolle

Velocità di risalita

- Ogni modello decompressivo specifica una massima velocità di risalita.
- US navy 18m/min, corretta poi a 10m/min
- Modello Buhlmann 10m/min
- Accordo generale sui 10m/min per l'ARIA
- Per il trimix (elio) le velocità di risalita diminuiscono!

Studio DAN sulle V di risalita in aria

- Velocità minori di 10m/min non sono efficaci.
- <10m/min vantaggiose per i tessuti veloci
- <10m/min svantaggiose per i tessuti lenti

Immersioni con deco
obbligatoria

Bubble Incidence After Staged Decompression from 50 or 60 msw: Effect of Adding Deep Stops

JEAN-ÉRIC BLATTEAU, MICHEL HUGON, BERNARD GARDETTE,
JEAN-MARIE SAINTY, AND FRANÇOIS-MICHEL GALLAND

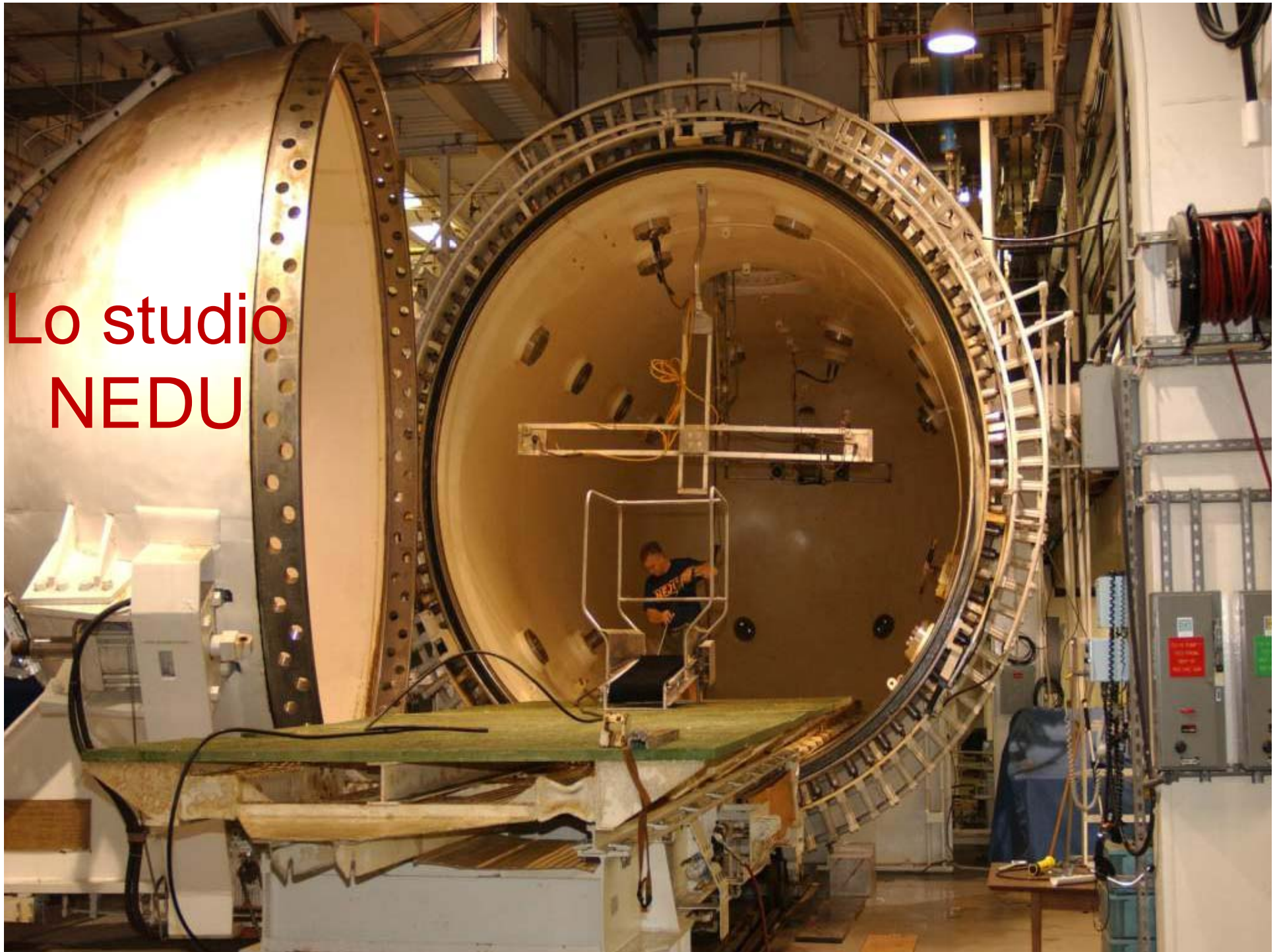
BLATTEAU J-É, HUGON M, GARDETTE B, SAINTY J-M, GALLAND F-M.
*Bubble incidence after staged decompression from 50 or 60 msw: effect
of adding deep stops. Aviat Space Environ Med 2005; 76:490-2.*

50 – 60m immersioni in aria con deco

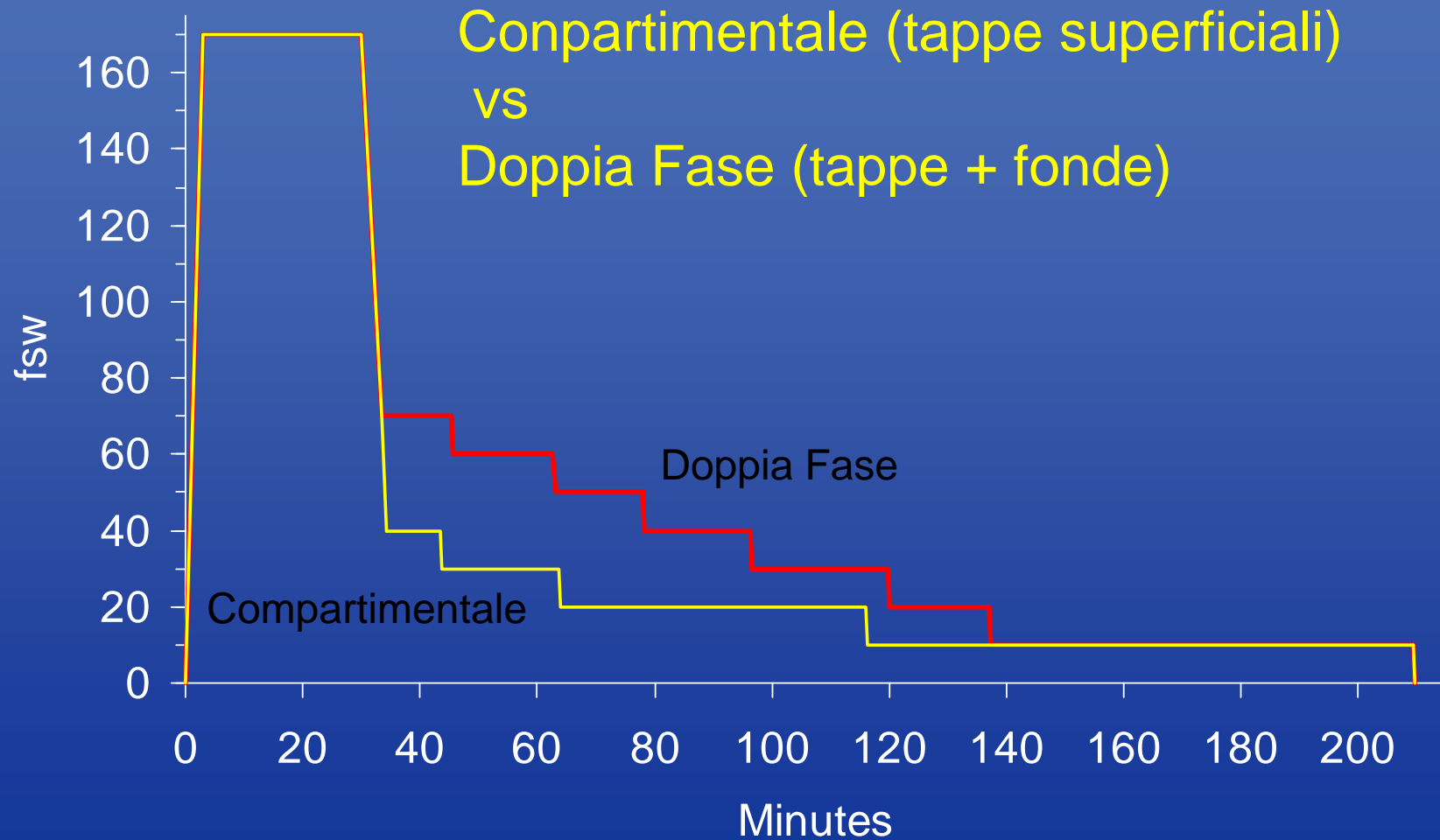
Misurazioni: bolle venose

Nessun vantaggio ad aggiungere deep stop. Svantaggioso aggiungere deep stop (a 25/27m) alle immersioni ripetitive.

Lo studio
NEDU



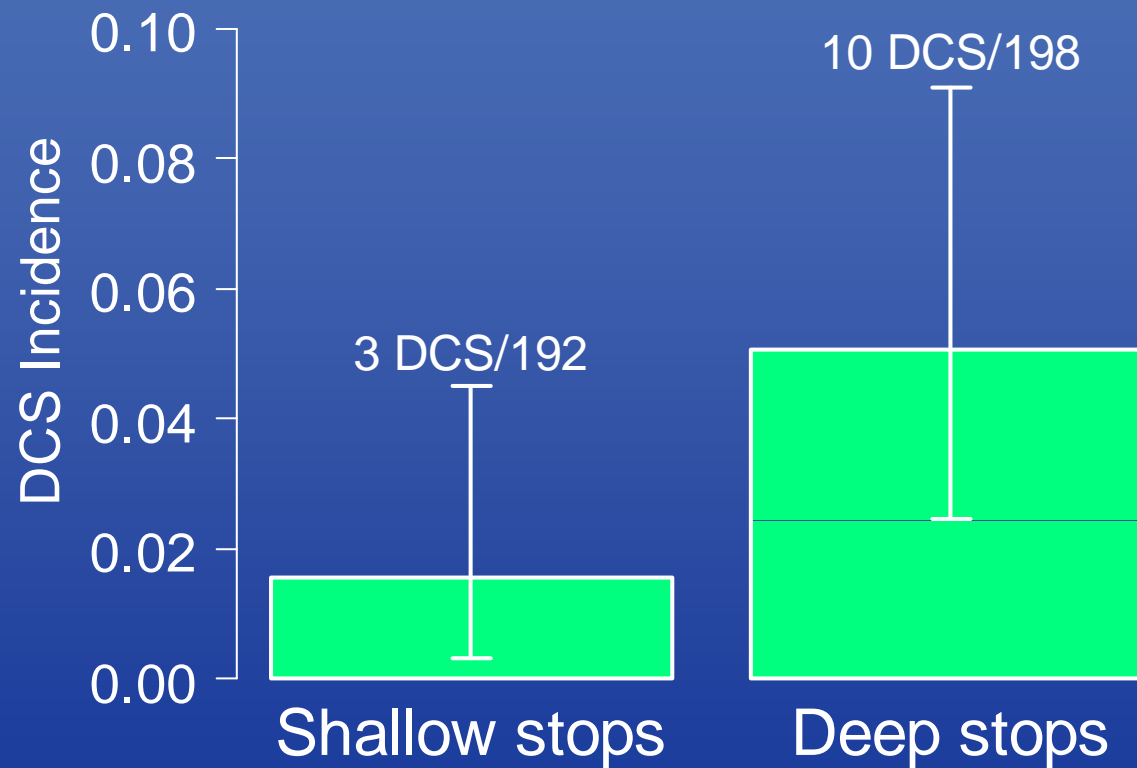
Deco da 51m per 30 min in aria



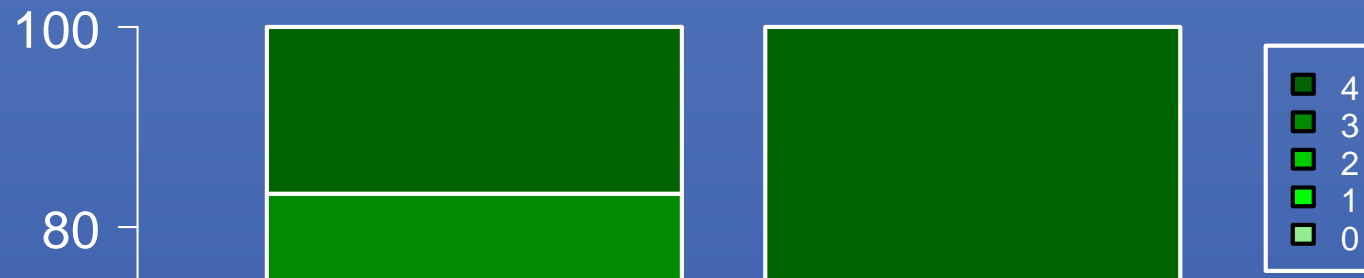
- Esercizio fisico a 115 watts sul fondo
- Temp 30°C
- Misurazioni:
Bolle
Casi di MDD



DCS Incidenza



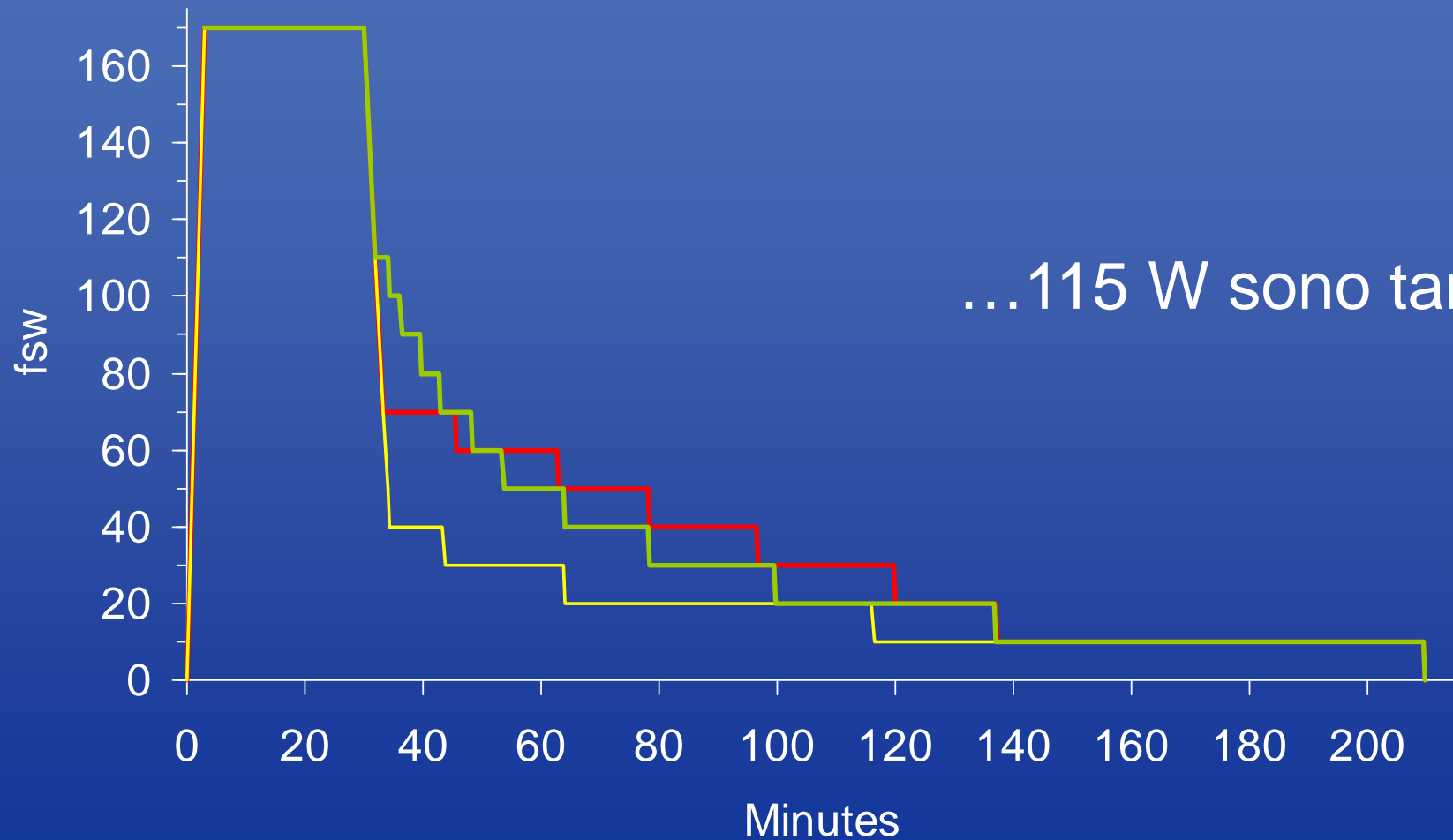
Grading delle bolle



Navy declined to adopt bubble model decompressions for routine operations



In realtà il modello di doppia fase utilizzato era diverso da quelli adottati comunemente nella subacquea tecnica (verde)



...115 W sono tanti.

Il punto...

La distribuzione delle tappe più in profondità porta ad una minore sovrassaturazione dei tessuti veloci, ma ad una maggior sovrassaturazione di quelli lenti.

Immersioni tecniche

Fase profonda:

Sostituzione dell'azoto con elio:

- Meno narcotico
- Più piccolo e leggero (veloce)

Riduzione
dell'esposizione
all'ossigeno sul fondo
(MAX 1,3 ATA)

Fase Decompressiva:

Switch a Nitrox in
risalita

Deco finale in
ossigeno 100%

L'effetto infiammatorio associato ad immersioni tecniche e sportive

IL PROGETTO

- Confronto tra differenti modelli decompressivi utilizzati in immersioni tecniche;
- Confronto tra immersioni tecniche ed immersioni ricreative in minima decompressione.



Il progetto....

DECOMPRESSION PROFILES

PROFILI
DECOMPRESSIVI
A CONFRONTO

Il prof. Enzo Spisni (Università Bologna) e
Klarida Hoxha (Centro Iperbarico Ravenna)
impegnati nei prelievi di sangue (analisi
citochine pro-infiammatorie) e analisi urine



Elaborazione del profilo V-Planner
durante il primo progetto pilota

SCOPO DELLA RICERCA

MODELLI COMPARTIMENTALI
(DECO PLANNER)

VS

MODELLI A DOPPIA FASE
(V-PLANNER)

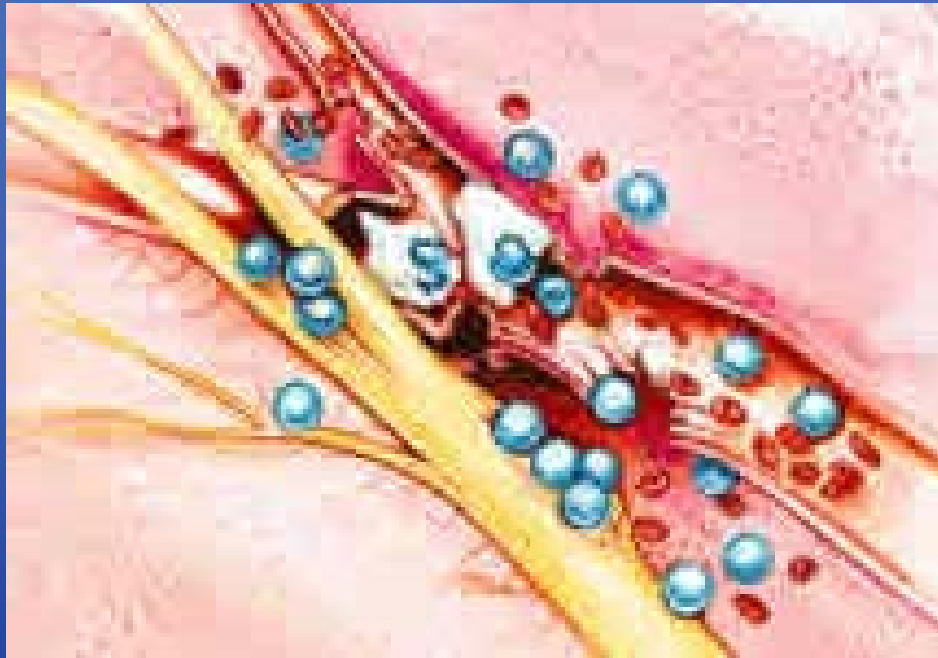
MODELLI MNEMONICI
(RATIO DECO)

- PRODUZIONE DI BOLLE

- PROFILO INFIAMMATORIO



FISIOPATOLOGIA DELLA DCS



RISPOSTA IMMUNITARIA

ENDOTELIO

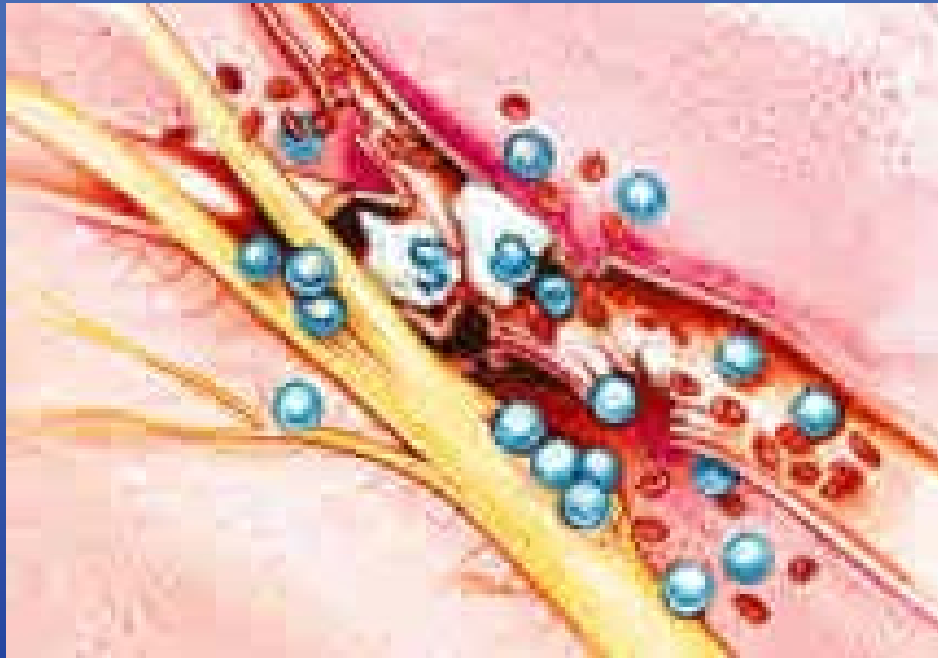
LEUCOCITI

PIASTRINE

COMPLEMENTO



FISIOPATOLOGIA DELLA DCS



RISPOSTA IMMUNITARIA

ENDOTELIO

LEUCOCITI

PIASTRINE

COMPLEMENTO

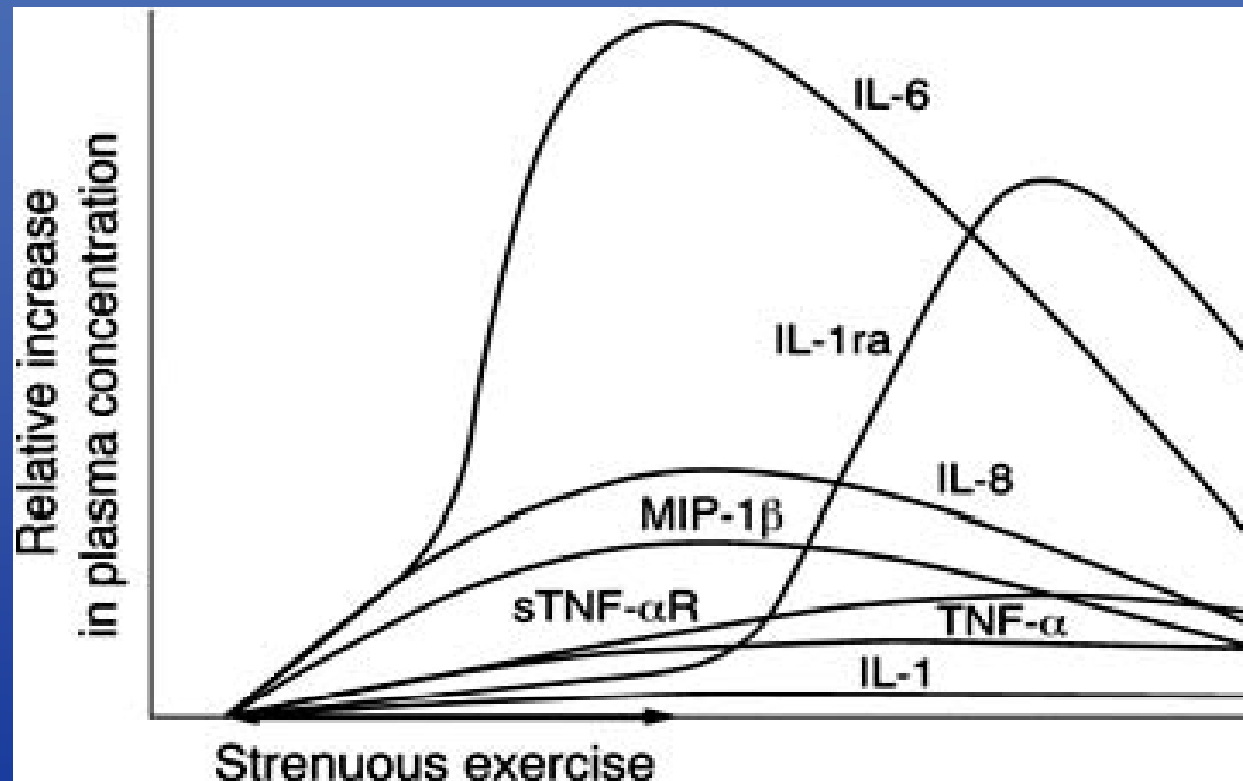
MEDIATORI DELL'INFIAMMAZIONE.

Citochine e **Chemochine**



Background

Inflammatory profile is affected by strenuous physical activity



Regular exercise decrease the inflammatory response

Inflammation increase during DCS in rats.

JOURNAL OF INTERFERON & CYTOKINE RESEARCH 28:55–63 (2008)

© Mary Ann Liebert, Inc.

DOI: 10.1089/jir.2007.0084

Inflammatory Cytokines and Cell Adhesion Molecules in a Rat Model of Decompression Sickness

NANCY J. BIGLEY,^{1,2,3,4} HEATHER PERYMOM,¹ GLORIA C. BOWMAN,¹
HAROLD F. STILLS, Jr.,⁴ and RICHARD A. HENDERSON¹

TABLE 1. INFLAMMATORY CYTOKINES^a PRESENT IN SERUM SAMPLES (PG/ML)

Time	2 ATA	3 ATA	4 ATA
6 h			
TNF- α	893 \pm 241	533 \pm 43	971 \pm 427
IFN- γ	2028 \pm 509	6500 \pm 1500	5689 \pm 1486
IL-6	75 \pm 75	440 \pm 254	357 \pm 206
24 h			
TNF- α	ND ^b	ND	ND
IFN- γ	ND	ND	ND
IL-6	246 \pm 26	152 \pm 88	2167 \pm 811

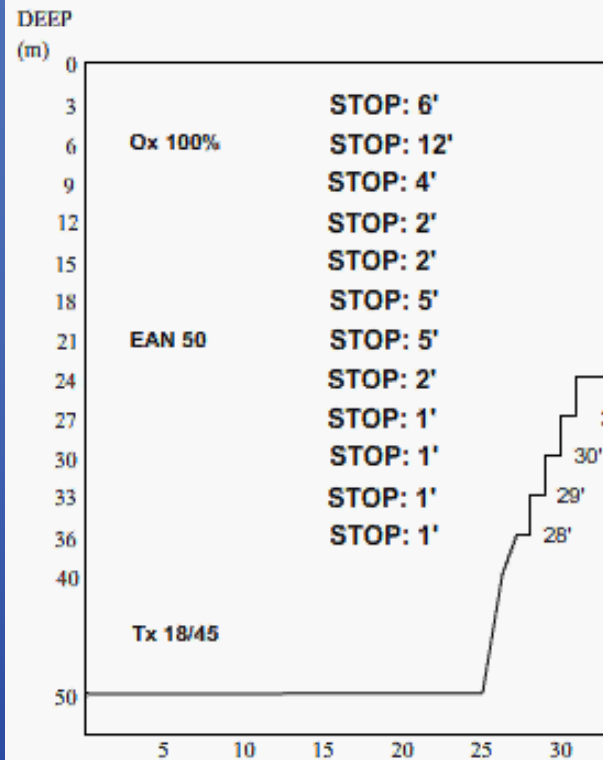
^aLevels of IL-1 β were below detectable limits at both 6 and 24 h.

^bND, none detected (below limits of detection). Cytokines were not detected within the limits of the assays in control sera (sera from 1 ATA rats).

The dives

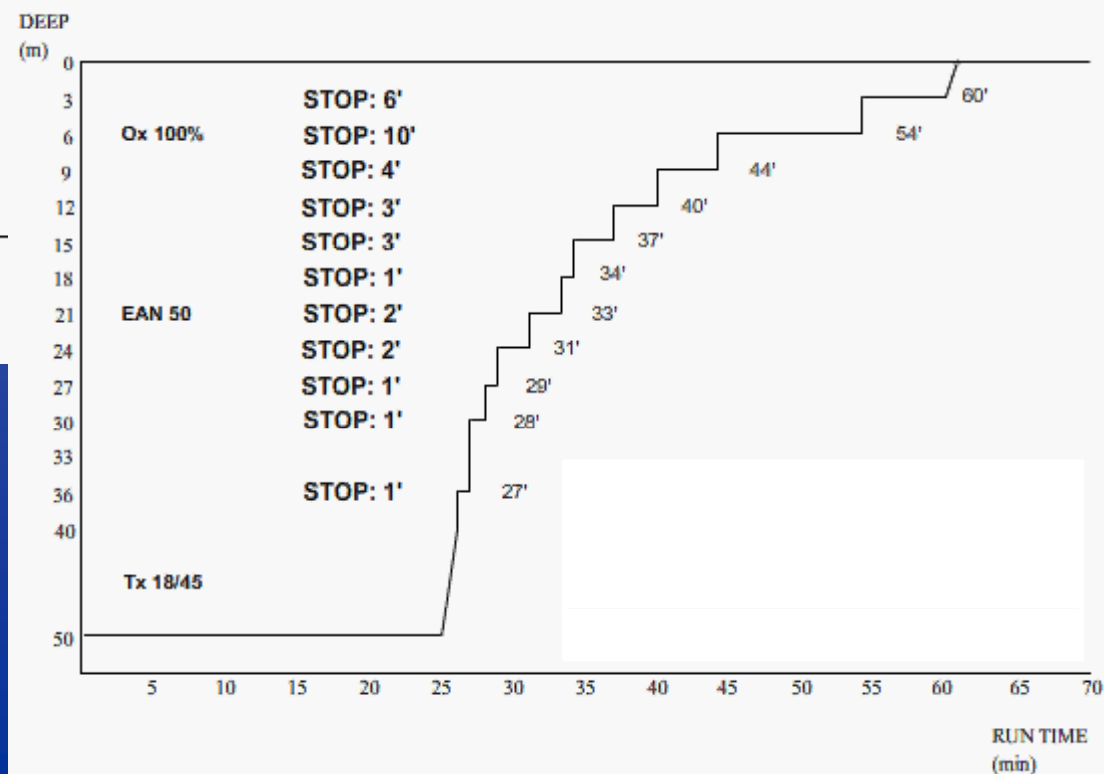
- Tek Dives
- Gas: Trimix 18/45
- Deco Gas 1: EAN 50
- Deco Gas 2: Oxygen
- Max depth: 58 m
- Average depth 50m
- Dive time 25 min
- Rec Dive
- Gas: Air
- Deco Gas: no
- Max depth: 30m
- Dive time 25 min
- Ascent rate:
10m/min

Decompression profiles



Ratio Deco (doppia Fase)

Compartimentale



Locations:

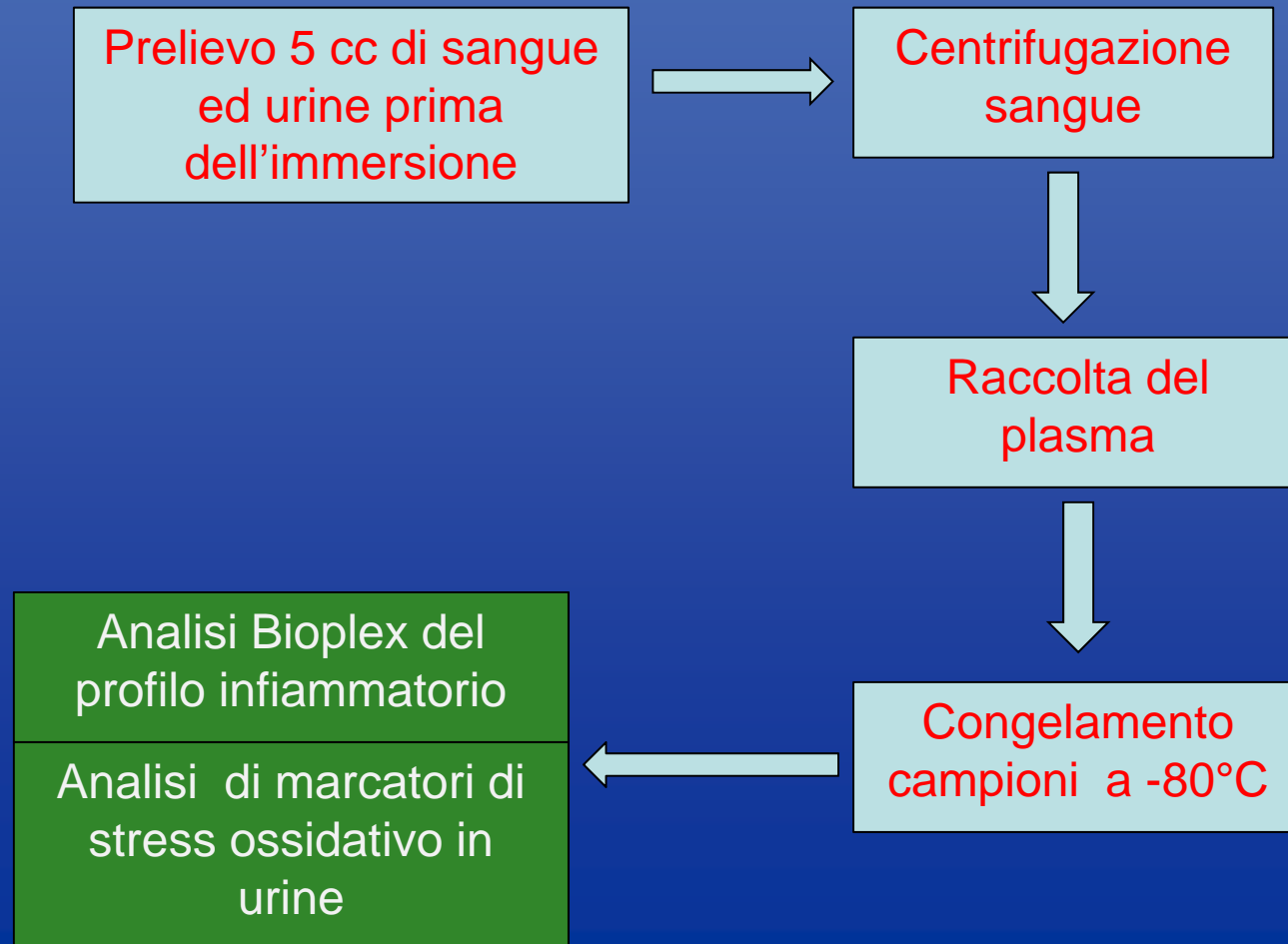


Locations:NASIM



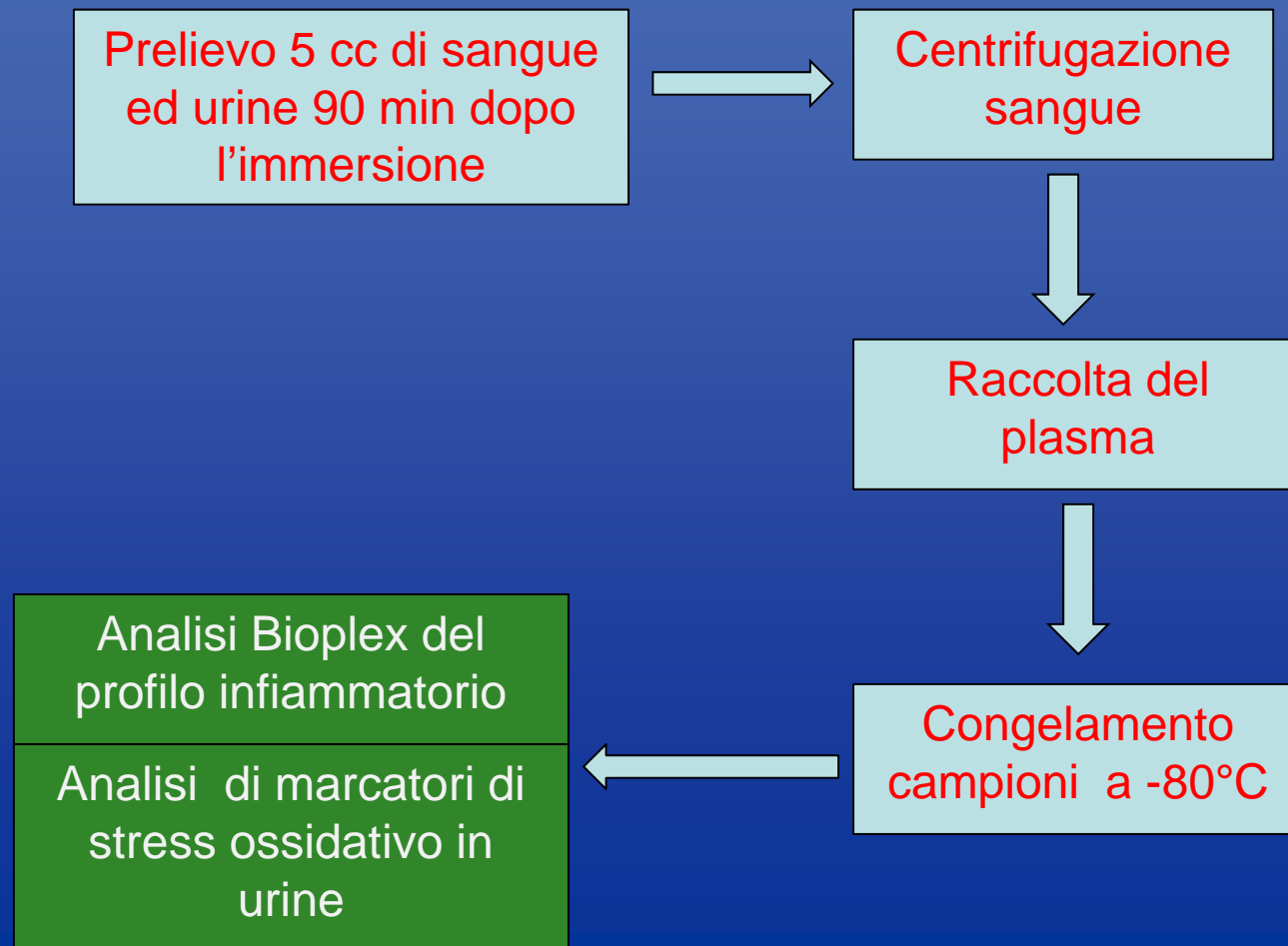
Il disegno sperimentale

Profilo infiammatorio pre-dive



Il disegno sperimentale

Profilo infiammatorio post-dive





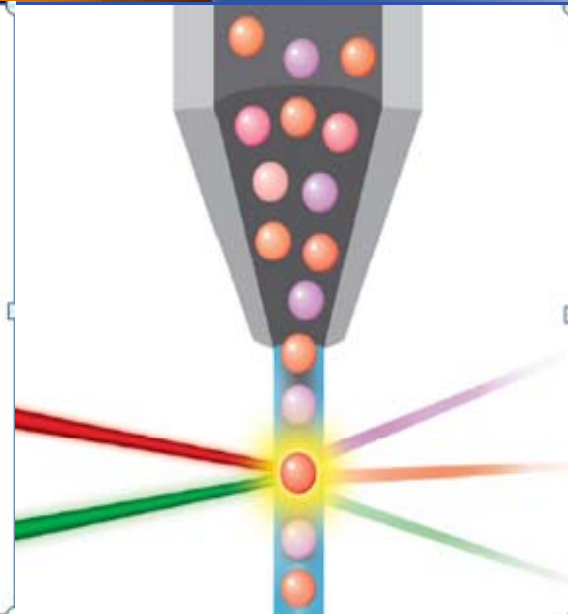
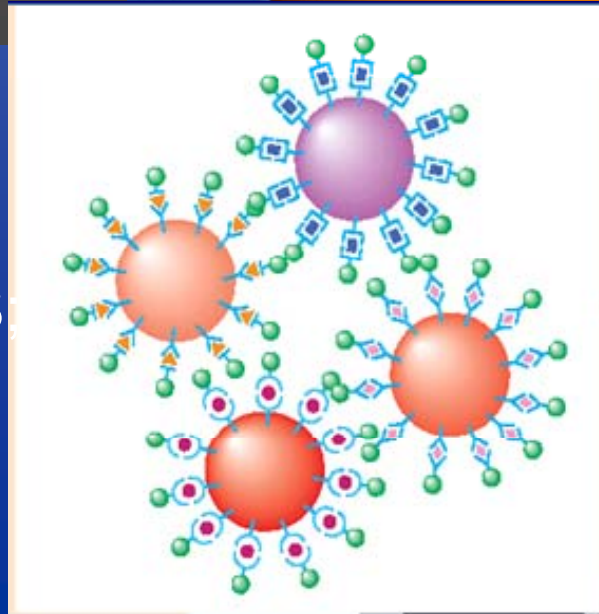
ECOCARDIOGRAPHY:

(by Dr. Marabotti)





IL-1B, IL-6, IL-8;
MIP-1B, MCP-1, RANTES



Results

(Compartimentale vs Ratio deco)

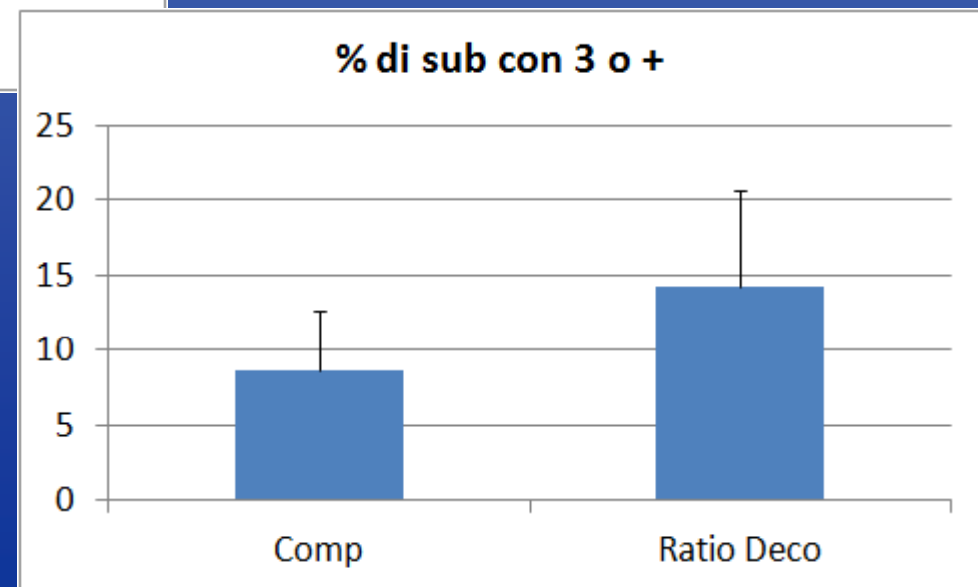
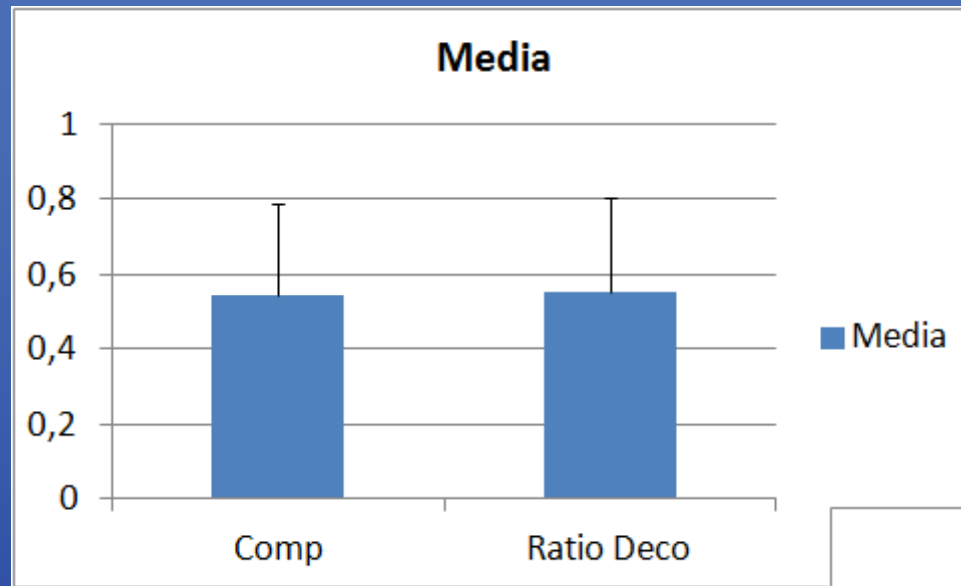


Analisi delle urine

- Densità media urine pre dive 1014 mg/ml
- Densità media urine post dive 1017 mg/ml

Differenze non significative, ma valori
medi piuttosto elevati...

Grading Bolle



Profili infiammatori (post-pre)

I risultati mostrano un leggero aumento di alcune chemochine pro-infiammatorie, collegate ai meccanismi di danno endoteliale ad all'infiltrazione di linfociti nelle pareti dei vasi, nei subacquei che hanno seguito il profilo ratio deco nei confronti di quelli che hanno seguito una risalita secondo il modello compartimentale.

Nessuna differenza è invece osservabile, per i profili infiammatori post-immersione, tra i subacquei ricreativi ed i subacquei tecnici che hanno utilizzato il profilo compartimentale.

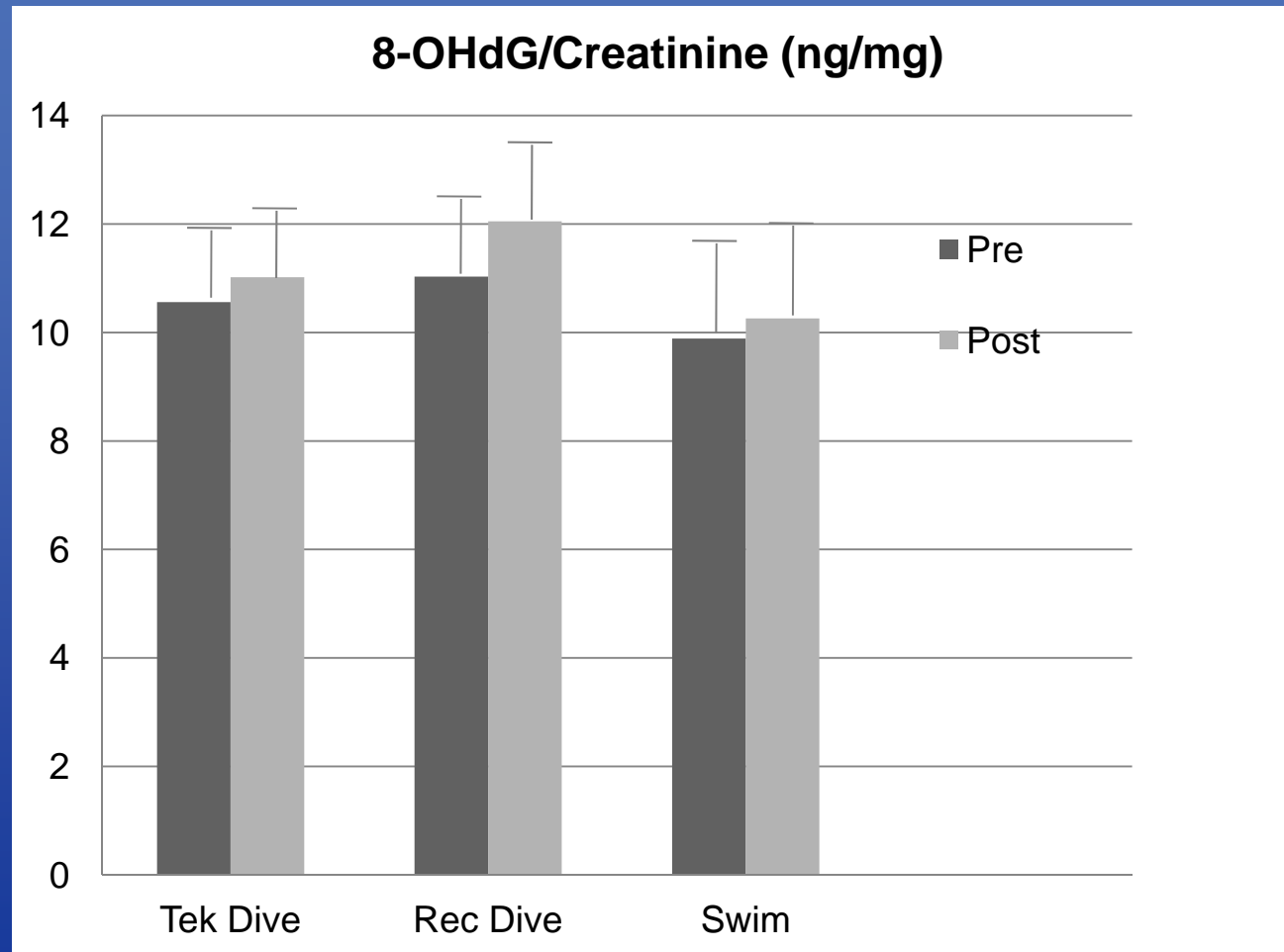
Risultati: ragioniamoci

- 1) Abbiamo confrontato due profili entrambi validi e poco bolligeni.
- 2) Per l'immersione analizzata il modello decompressivo Ratio Deco si presenta leggermente peggiorativo rispetto al compartimentale, pur prevedendo una deco più lunga;
- 3) I vantaggi della Ratio Deco sono anche quelli legati alla standardizzazione nella scelta dei gas;
- 4) L'analisi di una sola immersione al "limite del Tek" non permette di trarre conclusioni sull'intero modello decompressivo.

Risultati

(l'effetto pro-ossidante dell'ossigeno)

Urine 8-hydroxy-2-deoxy guanosine



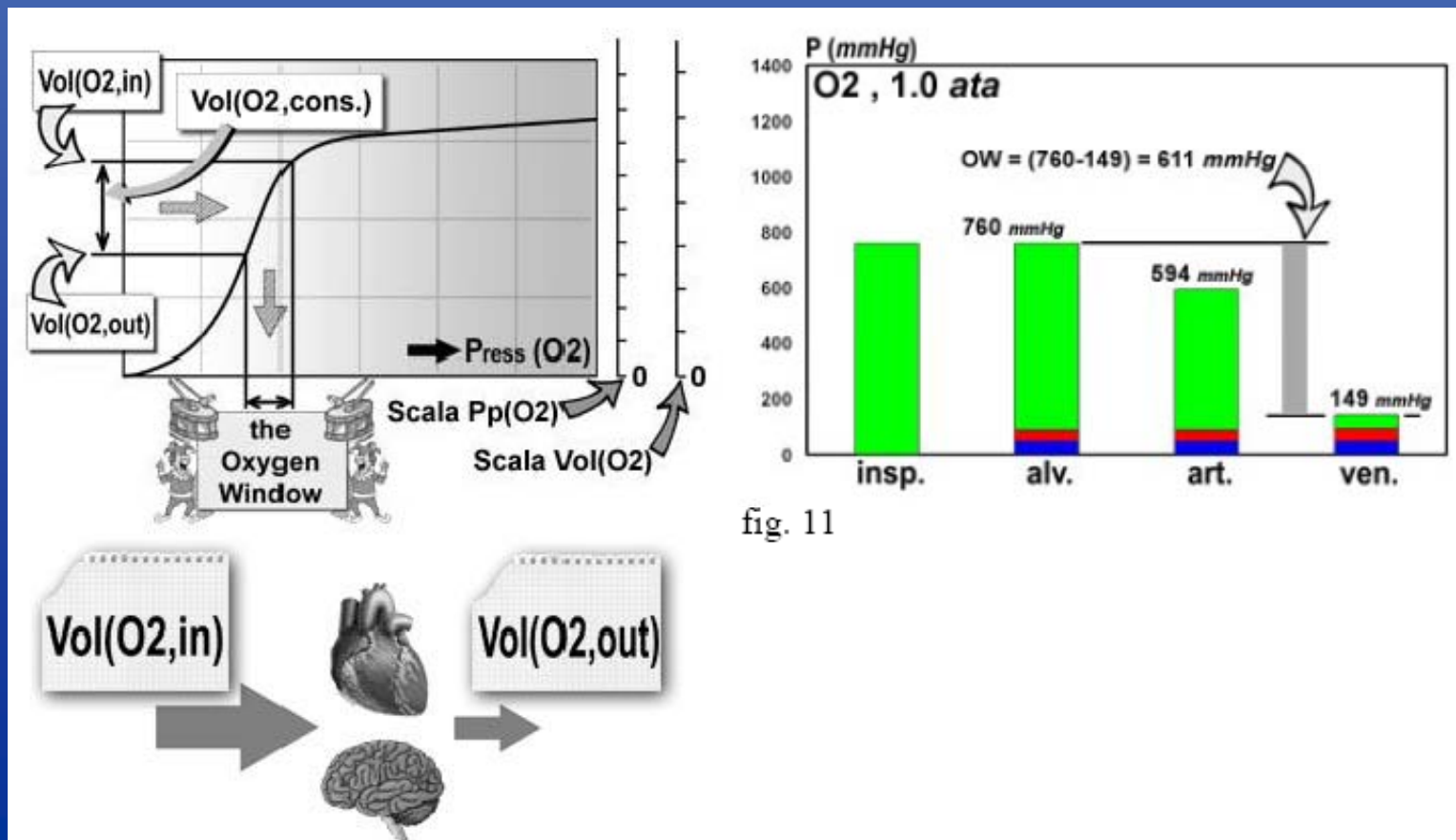
Conclusioni

- Effetto Elio (Air / Trimix)?
- Effetto Ossigeno?
- **Elio e ossigeno amici dei SUB!**

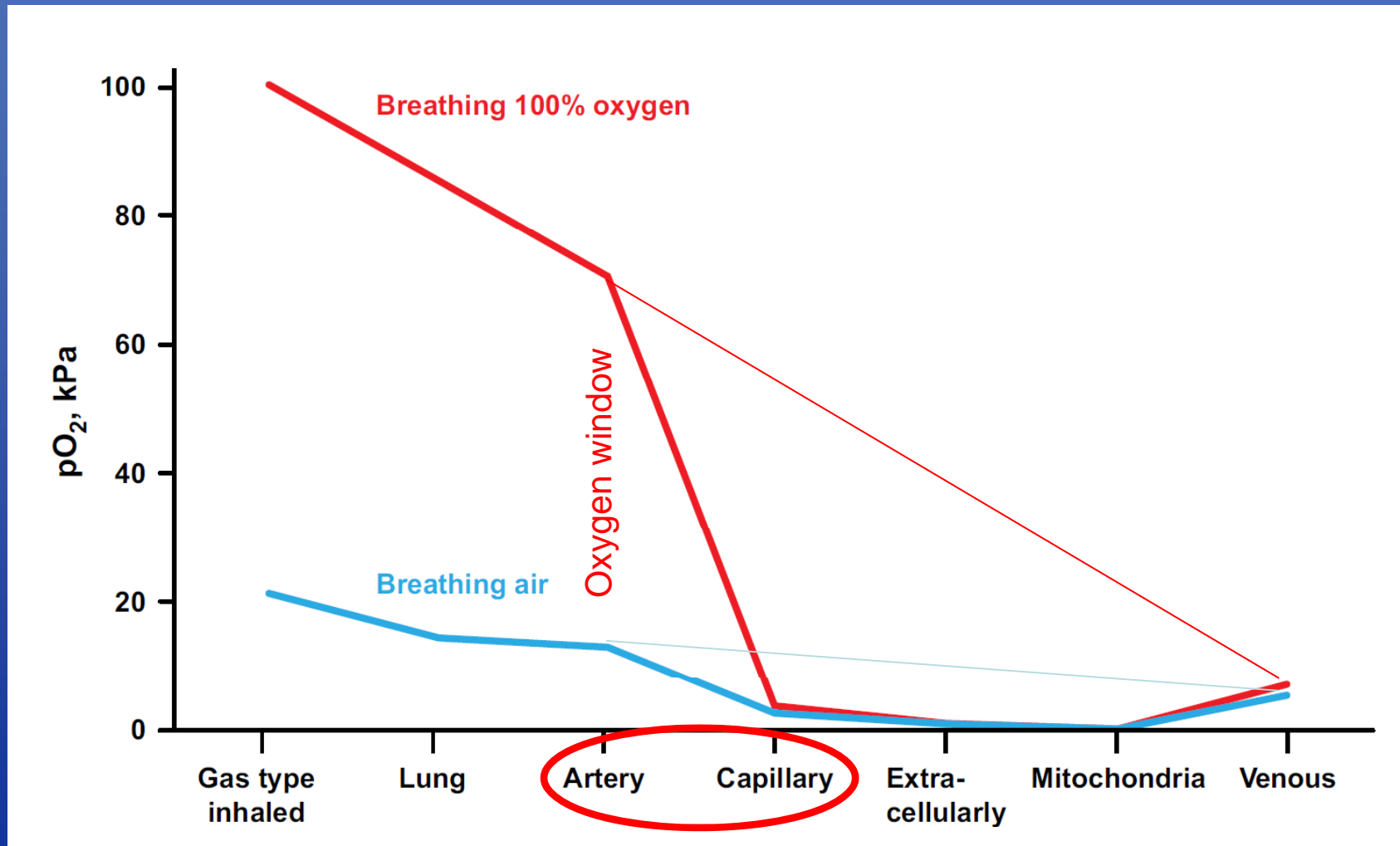
L' effetto ossigeno....

La finestra di ossigeno

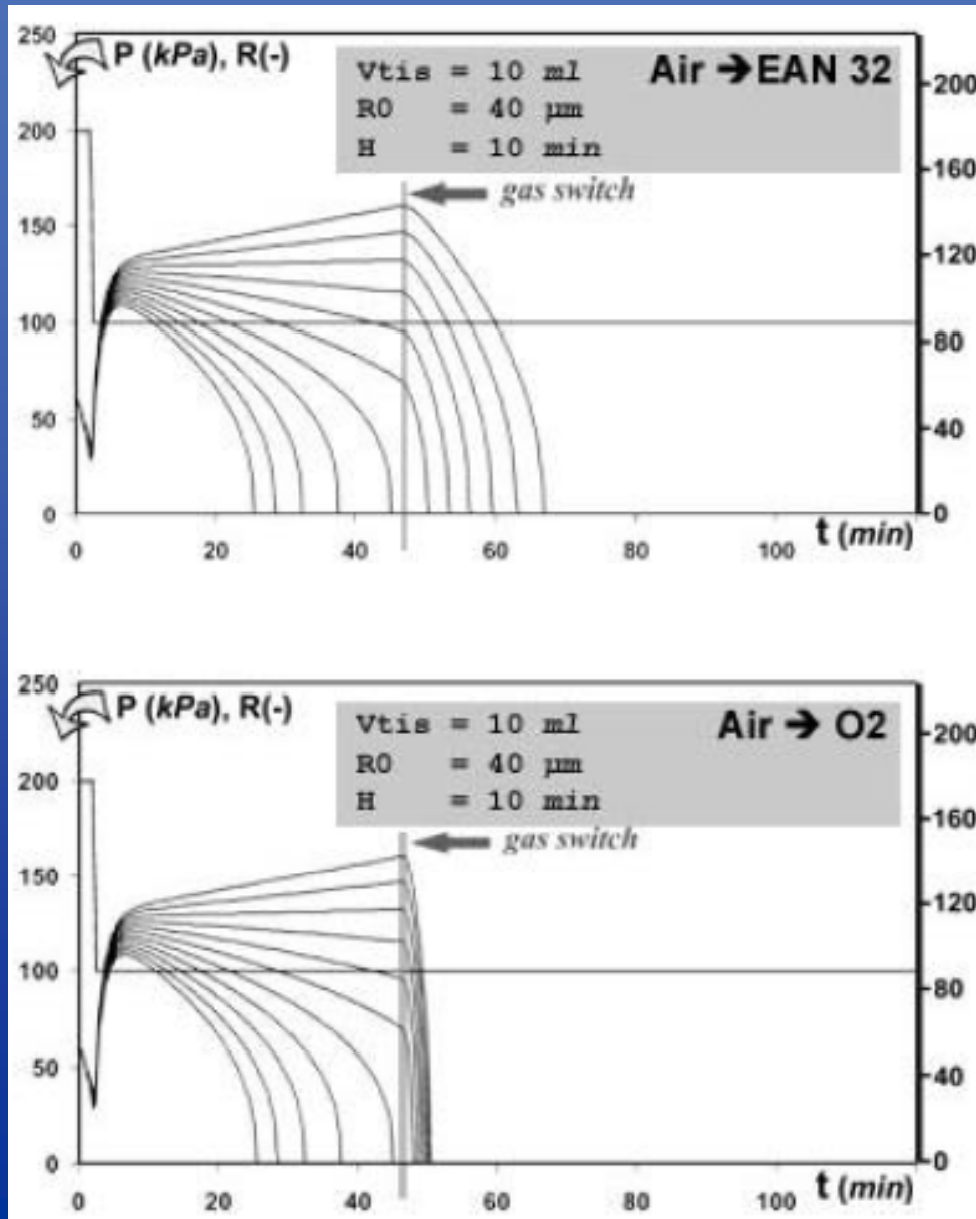
Nella subacquea è la differenza tra ppO_2 del sangue arterioso e la ppO_2 del sangue venoso



La cascata dell'ossigeno



Effetto dell'ossigeno sulle bolle



- Facendo riferimento ai concetti della diapo precedente, si può notare come una miscela iperossigenata porti ad avere un max gradiente possibile tra gas inerte all'interno e all'esterno della bolla, con conseguente maggiore velocità di dissolvimento della bolla.

Effetto dell'ossigeno sull'infiammazione

EXPERIMENTAL CELL RESEARCH 318 (2012) 207–216

Changes in inflammatory gene expression induced by hyperbaric oxygen treatment in human endothelial cells under chronic wound conditions

Alexandra C. Kendall^{a,b}, Jacqueline L. Whatmore^a, Lorna W. Harries^a, Paul G. Winyard^a, Gary R. Smerdon^b, Paul Eggleton^{a,*}

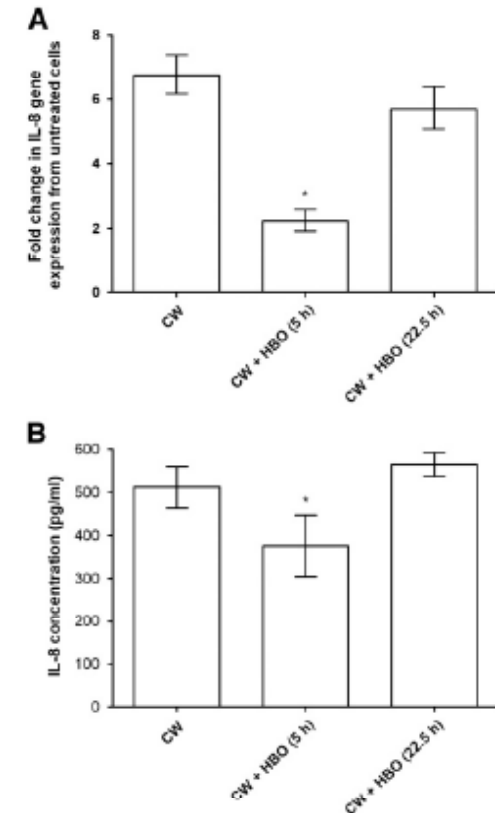


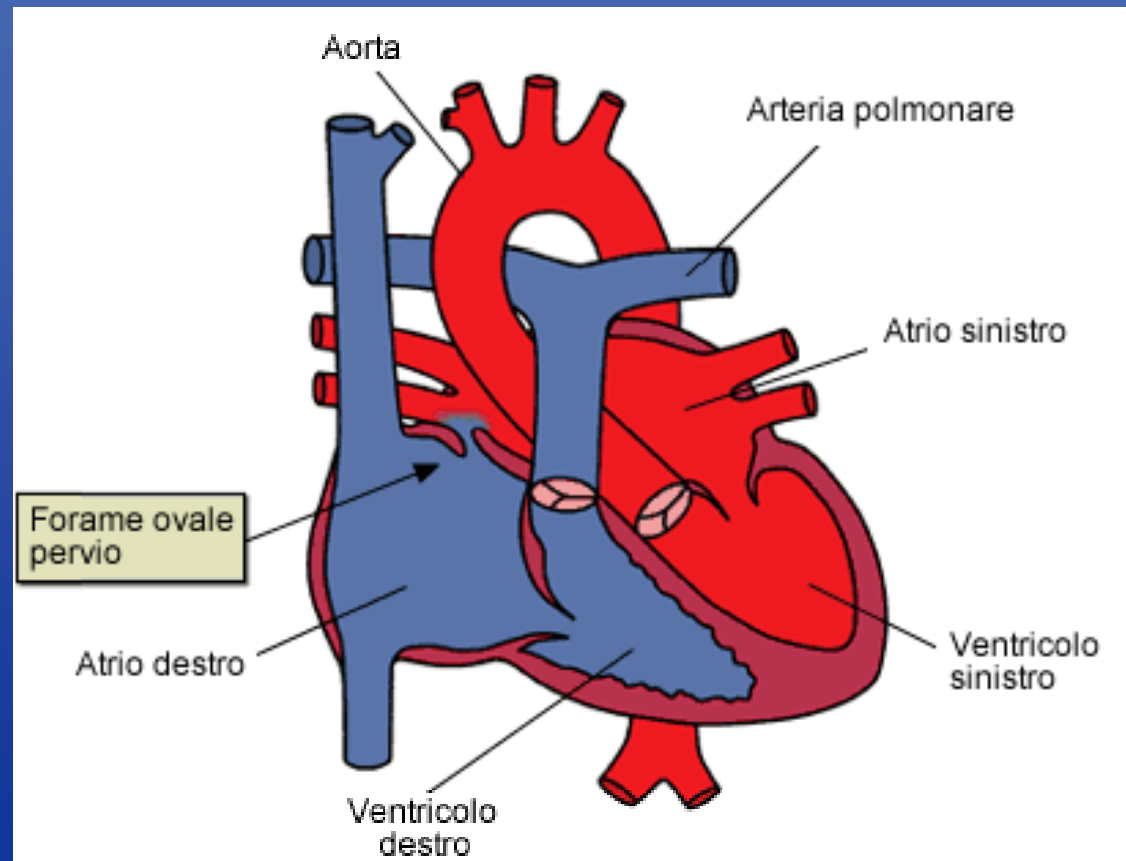
Fig. 4 – Effect of HBO on IL-8 mRNA and protein expression with time. HUVEC were treated with CW conditions for 24 h then given a 90 min treatment with HBO. mRNA and cell culture medium were collected 5 h and 22.5 h post-treatment and analysed for IL-8 gene expression and protein concentration, respectively. (A) IL-8 mRNA expression presented as mean fold changes \pm S.D. in relative gene expression normalised to four control genes, and compared to unstimulated (US) cells. (B) IL-8 protein levels relative to US cells at the same time points. Data expressed as the mean \pm S.D. (N = 3). *P < 0.05 versus CW (5 h).

I fattori di rischio per la DCS

Pericolo elevato di DCS

Il Forame Ovale Pervio, (PFO) definisce un'anomalia cardiaca in cui l'atrio destro comunica con il sinistro a livello della fossa ovale tra septum primum e il septum secundum. Statisticamente interessa all'incirca il 25-30% della popolazione adulta.

- Portatori di PFO



Pericolo elevato di DCS!!!

- FOP
- Portatori di patologie infiammatorie (non trattate)
- Ammalati di Diabete



Fattori predisponenti

- LA DISIDRATAZIONE

Densità urine >1015 mg/ml

(Colore giallo!)



La disidratazione

- Occorre bere molta acqua (1.5-2 lt/giorno) iniziando già 2-3 giorni prima delle immersioni.
- Durante le immersioni bere molto prima e dopo i tuffi, soprattutto se in clima caldo-umido.
- Buona idratazione significa buona emodiluizione e minor attività di microbolle o particelle (interaz con proteine)

La disidratazione

- Soft drink o succhi sono meno efficaci
- Se contengono the o caffè (Coca) ancora meno, perché sono diuretici!
- L'alcool causa forte disidratazione: evitarlo durante le settimane blu.

Fattori predisponenti

- I PROFILI SBAGLIATI

Yo-yo, dente di sega, invertiti.

Immersioni quadrate senza corrette deep stop (vedi avanti!).

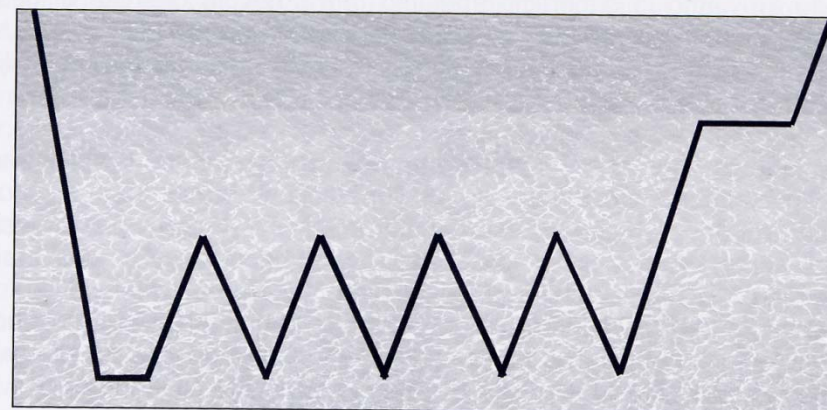


Figura 38: Profilo a dente di sega

Fattori predisponenti

- Immersioni ripetitive

1 giorno di STOP ogni 6 di immersioni ripetitive

1 giorno di stop ogni 4 di immersioni ripetitive con deco obbligatoria

Fattori predisponenti

- IL FREDDO
- Soprattutto il cambio di temperatura durante l'immersione.
- Un brusco aumento della sensazione di freddo a fine immersione predispone fortemente a DCS

Fattori predisponenti

- L'OBESITA (cfr addominale >94/88cm)
- I lipidi circolanti (dislipidemie) innescano la formazione di bolle
- L'azoto è 5 volte più solubile nei tessuti grassi che in quelli magri
- Infiammazione?
(i maledetti tessuti lenti!)



Fattori predisponenti

- **FORMA FISICA:** Non avere un Buon equivalente metabolico (almeno MET>7)
- Il metabolic equivalent of task (MET) misura il tasso di metabolismo e varia da 0.9 (dormendo) a 18 (correndo). Se non si arriva almeno a 7 (allenamento/età) il rischio di MDD aumenta.



Fattori predisponenti

- IL FUMO
- I fumatori di lunga data presentano ostruzione polmonare cronica
- La nicotina è vasocostrittore (minor perfusione) e il monossido di carbonio aumenta nei fumatori limitando il trasporto di ossigeno

Lecture medie a fine giornata:

- 0 - 10 ppm di CO in un non fumatore
- 11 - 20 ppm di CO in un fumatore leggero
- 21 - 100 ppm di CO in un fumatore pesante



Fattori predisponenti

- LE FERITE
- Le regioni cicatriziali hanno una vascolarizzazione ridotta ed una perfusione limitata.
- I sub che hanno subito lesioni hanno maggior probabilità di MDD



Grazie e...
buone
DECO!!!



References

Bubbles, microparticles and neutrophil activation: changes with exercise level and breathing gas during open-water SCUBA diving. Thom SR, Milovanova TN, Bogush M, Yang M, Bhopale VM, Pollock NW, Ljubkovic M, Denoble PJ, Madden D, Lozo M, Dujic Z. J Appl Physiol. 2013 Mar 14. [Epub ahead of print]

Microparticles initiate decompression-induced neutrophil activation and subsequent vascular injuries. Thom SR, Yang M, Bhopale VM, Huang S, Milovanova TN. J Appl Physiol. 2011 Feb;110(2):340-51.

Inflammatory cytokines and cell adhesion molecules in a rat model of decompression sickness. Bigley NJ, Perymon H, Bowman GC, Hull BE, Stills HF, Henderson RA. J Interferon Cytokine Res. 2008 Feb;28(2):55-63.

Changes in inflammatory gene expression induced by hyperbaric oxygen treatment in human endothelial cells under chronic wound conditions. Kendall AC, Whatmore JL, Harries LW, Winyard PG, Smerdon GR, Eggleton P. Exp Cell Res. 2012 Feb 1;318(3):207-16

The medical use of oxygen: a time for critical reappraisal. Sjöberg F, Singer M. J Intern Med. 2013 Dec;274(6):505-28. doi: 10.1111/joim.12139.

The background of the slide is a deep teal or dark cyan color, featuring a dense cluster of bubbles rising from the bottom center, creating a sense of depth and movement. The bubbles vary in size and are more concentrated in the center, fading towards the edges.

Enzo Spisni

Dept. of Biological, Geological and
Environmental Sciences

University of Bologna

Via Selmi 3, 40126 Bologna

enzo.spisni@unibo.it